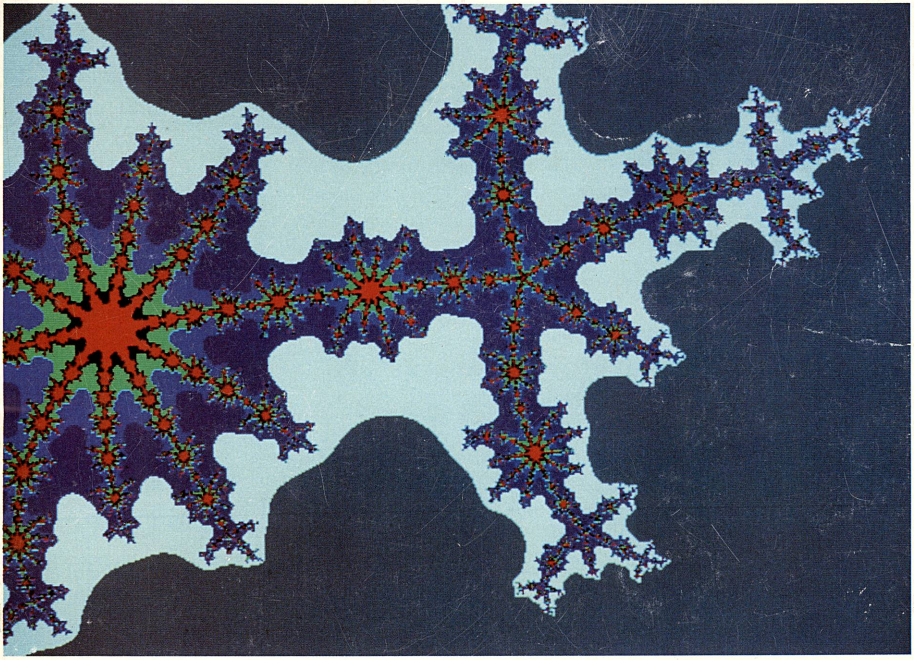
Kraker - Paill

Physik

HTL Band 3

Elektrizitätslehre



E. DORNER

Kraker - Paill

Physik, Band 3

Elektrizitätslehre

Gedruckt auf österreichischem umweltschonend gebleichtem Papier

E. DORNER

Mit Bescheid des Bundesministeriums für Unterricht und Kunst, Zl. 42.354-I/9/91, für den Unterrichtsgebrauch an allen höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten mit Ausnahme der Fachrichtungen Elektrotechnik, Elektronik, Textiltechnik (Ausbildungszweige Weberei und Spinnerei sowie Wirkerei und Stickerei) in den Jahrgängen I bis III geeignet erklärt.

Benützerhinweise:

Beispiel A, B, C, ...
durchgerechnete Anwendung eben erarbeiteter Inhalte

➤ **Beispiel A, B, C, ...**
Mit einem Pfeil bezeichnete Beispiele vermitteln außerdem einen für das weitere Verständnis unverzichtbaren Lernschritt.

Bildquellenverzeichnis:
Umschlagbild: Rollo Silver, Amygdala, San Christobal, NM - Bohmann Verlag, Wien: 38.1, 38.5, 40.1 - DEMAG, Düsseldorf: 54.2 - Norbert Kraker, Graz: 8.1 - OKA, Linz: 78.1 - Ferdinand Paill, Graz: 20.1, 79.2, 101.1, 107.2 - Siemens AG, Wien: 108.1, 108.2 - STEWEAG, Graz: 85.1 - Steyr-Daimler-Puch AG, Steyr: 6.4 - Verband der Elektrizitätswerke Österreichs: 95.3

Buch-Nr. 3838

Kraker - Paill: **Physik, Band 3 HTL**

©1991 by Verlag E. DORNER GmbH, Wien
Alle Ausgaben mit © 1991 sind nebeneinander verwendbar.
Nachdruck 1993

ISBN 3 - 7055 - **0065** - 1

Illustrationen: Wolfgang Greiderer, Datagraph Computergraphik GmbH, Wien
Satz: Verlag E. DORNER GmbH, Wien
Druck: Gerstmayer GmbH, Wien
Printed in Austria

Inhalt

1. Elektrisches Feld

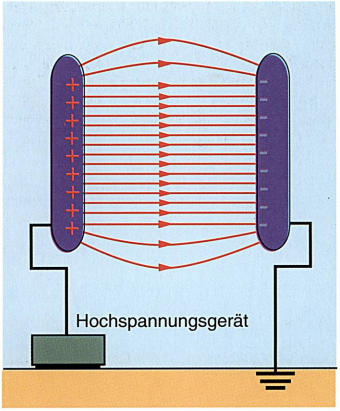
1.1 Elektrostatik 5
1.2 Coulombsches Gesetz 7
1.3 Superpositionsprinzip 8
1.4 Meßgeräte 9
1.5 Das elektrische Feld 9
1.6 Arbeit im elektrischen Feld 11
1.7 Influenz 12
1.8 Potential 12
1.9 Ladungsverteilung bei Leitern 14
1.10 Anwendungen 15
1.11 Kondensator 16
1.12 Kondensator und Dielektrikum 18
1.13 Bauformen von Kondensatoren 20
1.14 Elektrische Energie des Kondensators 21
1.15 Schaltungen von Kondensatoren 21
1.16 Piezoelektrizität 23

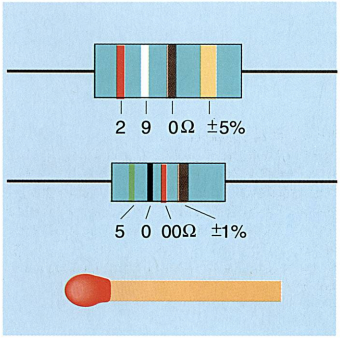
2. Grundgesetze des elektrischen Stromes, Gleichstrom

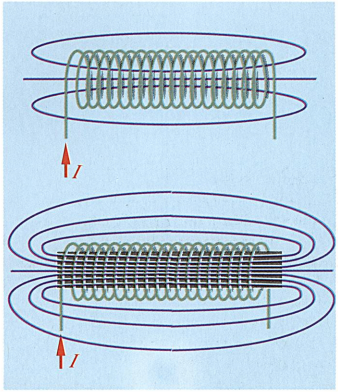
2.1 Elektrischer Strom 24
2.2 Das Ohmsche Gesetz 25
2.3 Spezifischer Widerstand 26
2.4 Temperatur und Widerstand 26
2.5 Bauformen von Widerständen 28
2.6 Elektrische Arbeit und Leistung 28
2.7 Innerer Widerstand 29
2.8 Schaltungen von Widerständen 31
2.9 Schaltung von Meßgeräten 33
2.10 Kirchhoffsche Regeln 34
2.11 Besondere Schaltungen 35
2.12 Kondensator im Gleichstromkreis 37

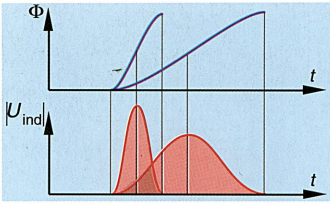
3. Magnetisches Feld

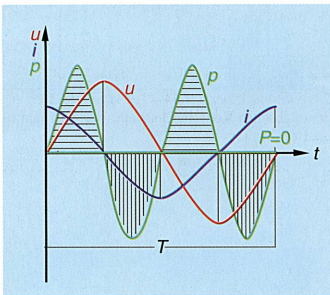
3.1 Grunderscheinungen des Magnetismus 38
3.2 Magnetische Felder 38
3.3 Kräfte im Magnetfeld 40
3.4 Magnetische Feldstärke (magnetische Erregung) 45
3.5 Magnetische Eigenschaften der Materie 47
3.6 Magnetischer Kreis 52
3.7 Anwendungen 54

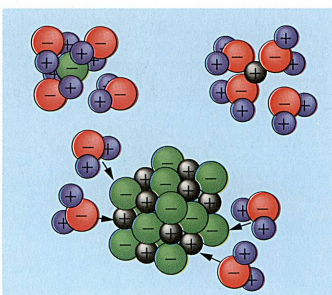


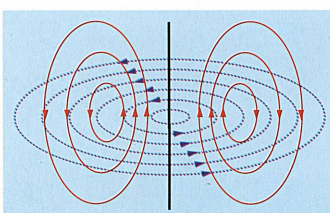












4. Induktion

4.1 Bewegung einer Leiterschleife im Magnetfeld 57
4.2 Bewegung eines Magneten 58
4.3 Lenzsche Regel 59
4.4 Bewegung eines Leiters im Magnetfeld 59
4.5 Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses der Feldspule . 60
4.6 Wirbelströme 61
4.7 Selbstinduktion 61
4.8 Energie des magnetischen Feldes 64

5. Wechselstrom

5.1 Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung 67
5.2 Einfacher Wechselstromkreis 68
5.3 Wechselstromkreis mit verschiedenen Bauelementen 71
5.4 Leistung im Wechselstromkreis 75
5.5 Transformator 78
5.6 Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom) 80
5.7 Schutzmaßnahmen 82

6. Generator und Motor

6.1 Gleichstromgenerator 84
6.2 Gleichstrommotor 84
6.3 Drehstromgenerator 84
6.4 Drehstrommotor 85
6.5 Einphasen-Wechselstrommotor 85

7. Stromleitung in Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern

7.1 Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten 86
7.2 Elektrizitätsleitung in Gasen 91
7.3 Elektrizitätsleitung im Vakuum 95
7.4 Elektrizitätsleitung in Festkörpern. Halbleiter 99
7.5 Thermoelektrizität 109

8. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

8.1 Schwingkreis 110
8.2 Erzeugung ungedämpfter Schwingungen 111
8.3 Hochfrequente Schwingungen (Dipolschwingungen) 112
8.4 Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen 113
8.5 Nachrichtenübertragung durch Radiowellen 115

Lösungen 118

Personen- und Sachregister 122

1. Elektrisches Feld

1.1 Elektrostatik

Die Elektrostatik ist jenes Teilgebiet der Elektrizitätslehre, welches sich mit ruhenden elektrischen Ladungen beschäftigt.

Bereits im Altertum waren elektrostatische Erscheinungen bekannt. Die griechischen Philosophen erkannten, daß Bernstein, mit einem Katzenfell gerieben, Haare, Wollfasern und ähnliche Stoffe anzieht. Diese Erscheinungen wurden von *Plato* in seinem Werk *Timaios* beschrieben. Der englische Arzt *William Gilbert* (1544 – 1603) beobachtete die gleiche Anziehung auch bei anderen Stoffen wie Glas, Schwefel, Wachs und Edelsteinen. Er führte den Begriff *Elektrizität* ein (griech. *elektron* = Bernstein). Der Franzose *Charles Du Fay* (1698 – 1739) nahm an, daß es zwei Arten von Elektrizität gibt, die er *Harz-* und *Glaselektrizität* nannte. Dazu drei Grundversuche:

Versuch (Abb. 5.2)

Ein Glasstab wird mit einem Seidenlappen gerieben und mit einer an einem Faden hängenden Stanniolkugel in Berührung gebracht. Die Kugel wird nach der Berührung abgestoßen.

Versuch (Abb. 5.3)

Bringt man nun in die Nähe der Kugel einen mit einem Katzenfell geriebenen Hartgummistab, so wird diese nicht abgestoßen, sondern angezogen.

Versuch (Abb. 5.4)

Man nimmt nun zwei Kugeln und berührt beide mit dem geriebenen Hartgummistab (oder dem Glasstab). Die beiden Kugeln stoßen einander ab.

Diese drei Versuche liefern folgende Erkenntnisse:

Die einzelnen Körper treten in Wechselwirkung miteinander. Diese Wechselwirkung kann jedoch nicht die Gravitationskraft sein – sonst hätten einander die beiden Kugeln im dritten Versuch ja schon vor der Berührung mit dem Hartgummistab abstoßen müssen! Die Ursache der beobachteten Wechselwirkung ist somit nicht die Masse, sondern eine neue physikalische Größe, die *elektrische Ladung*. Der Glasstab und der Hartgummistab werden durch das Reiben mit dem Lappen *elektrisch geladen*.

Der Begriff *Ladung* geht auf *Benjamin Franklin* (1706 – 1790) zurück. Historisch gesehen gab es bei der Begriffsbildung in der Elektrizitätslehre ähnliche Schwierigkeiten wie in der Wärmelehre. Man glaubte, daß die Ladung ein eigener Stoff sei, und verwendete daher dafür den Begriff *Elektrizitätsmenge*.

Die Einheit der Ladung Q ist 1 Coulomb (1 C) oder 1 Amperesekunde (1 As).

Aus dem ersten und dem zweiten Versuch ersieht man, daß es zwei Ladungsformen geben muß, denn das eine Mal wurde die Kugel abgestoßen, das andere Mal angezogen. Es wird nun willkürlich der Glasstab als *positiv geladen*, der Hartgummistab als *negativ geladen* bezeichnet. Die positiv geladene Kugel wird vom negativ geladenen Stab angezogen.

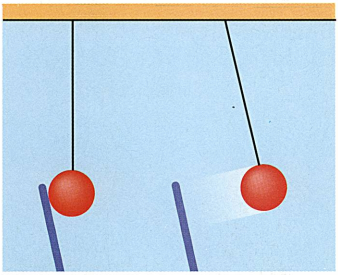
Aus dem dritten Versuch kann die Erkenntnis gewonnen werden, daß positive (negative) Ladungen einander abstoßen.

Es gibt zwei elektrische Ladungsformen: positive und negative Ladung. Ungleichnamige Ladungen ziehen einander an, gleichnamige Ladungen stoßen einander ab.

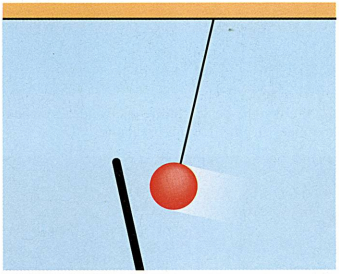
Wer sind die Träger der Ladung?

Der kleinste Ladungsträger ist das *Elektron*. Seine Ladung beträgt $1{,}6022 \cdot 10^{-19}$ C.

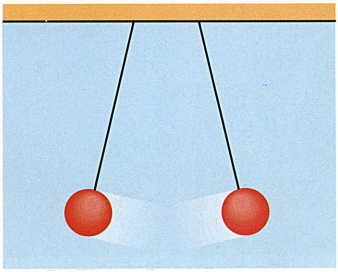
5.1 *William Gilbert* (1544 – 1603) war der Leibarzt der englischen Königin Elisabeth. Von ihm stammt die Bezeichnung *Elektrizität*.



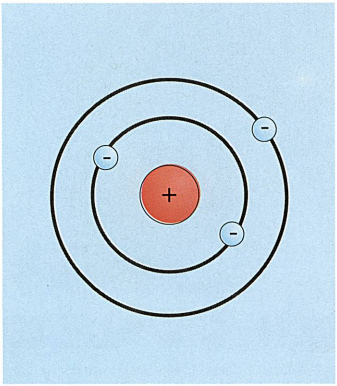
5.2 Nach der Berührung mit dem Glasstab wird die Stanniolkugel abgestoßen.



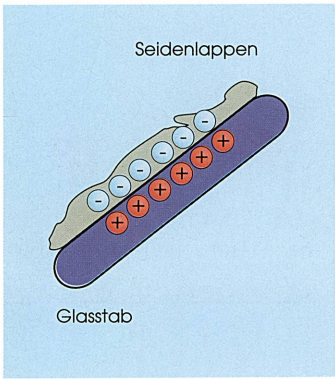
5.3 Der Hartgummistab zieht die Stanniolkugel an.



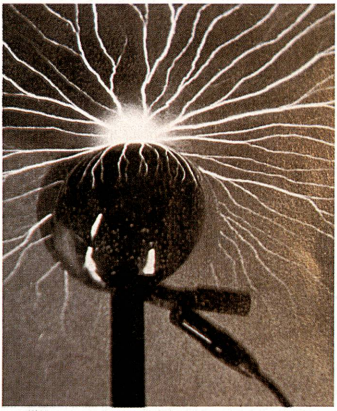
5.4 Diese Wechselwirkung wird nicht durch die Gravitation verursacht.



6.1 Dieses einfache Atommodell kann zur Erklärung der Reibungselektrizität herangezogen werden.



6.2 Werden die beiden Stoffe aneinander gerieben, kommt es zu einer Ladungstrennung.



6.3 Entladung einer stark geladenen Kugel über die Luft, die bei diesen Verhältnissen kein Isolator mehr ist.

Im Sinne der historischen Festlegung ist die Ladung des Elektrons negativ. Für unsere weiteren Betrachtungen ist das Elektron das wesentliche Teilchen. Das Proton, einer der "Bausteine" des Atomkerns, besitzt eine gleich große Ladung wie das Elektron, ist im Gegensatz dazu aber positiv.

Die Ladung eines Elektrons oder Protons wird als *Elementarquantum* oder *Elementarladung* bezeichnet. An einem elektrischen Vorgang können nur ganzzahlige Vielfache der Elementarladung beteiligt sein. Man sagt, die Ladung ist *gequantelt*.

Ladungen sind immer an materielle Teilchen gebunden. Größere Masse bedeutet jedoch nicht automatisch größere Ladung. Die Masse des Elektrons beträgt $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg, die Protonenmasse ist 1836mal so groß.

Im atomaren Bereich kann die Ladung auch in Teilen der Elementarladung auftreten. Dies ist bei den *Quarks* der Fall; sie bilden beispielsweise die Bestandteile des Protons.

Wie kommt die Reibungselektrizität zustande?

Zur Erklärung der *Reibungselektrizität* wollen wir auf ein einfaches Atommodell zurückgreifen: Ein Atom besteht aus einem positiv geladenen Kern und um den Kern kreisenden Elektronen, die negative Ladung aufweisen (Abb. 6.1).

Werden zwei Stoffe miteinander gerieben, kommt es zu einer Wechselwirkung der Elektronen beider Körper. Gibt ein Stoff dabei Elektronen an den anderen ab, sind beide nach der Trennung *elektrisch geladen*. Jener Stoff, der die Elektronen aufgenommen hat, ist negativ, der andere positiv geladen. Eine positive Ladung kommt durch Elektronenabgabe, eine negative Ladung durch Elektronenaufnahme zustande.

Positive Ladung bedeutet Elektronenmangel, negative Ladung Elektronenüberschuß.

Gehen Elektronen vom Glasstab auf den Seidenlappen über, dann entsteht auf dem Lappen ein Elektronenüberschuß und auf dem Glasstab ein Elektronenmangel. Es sind aus zwei *elektrisch neutralen Körpern* zwei *elektrisch entgegengesetzt geladene Körper* entstanden. Man kann also eine positive oder negative Ladung nicht allein erzeugen, sondern immer nur gleich große Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens voneinander trennen. Betrachtet man die beiden Körper als abgeschlossenes System, ist die Summe der Ladungen vor und nach der Ladungstrennung gleich. Daraus folgt der *Erhaltungssatz für Ladungen:*

In einem abgeschlossenen System ist die Summe der positiven und negativen Ladungen stets konstant.

Leiter und Nichtleiter

Der englische Physiker *Stephen Gray* (1670 – 1736) entdeckte, daß einige Stoffe, wie z. B. Messing, die Elektrizität besser leiten, während andere Materialien, beispielsweise Seide, sie nicht "durchlassen".

Stoffe, in denen sich die Elektronen leicht bewegen können, werden *Leiter* genannt. Das Fließen der Elektronen wird als *elektrischer Strom* bezeichnet. Die besten Leiter sind Metalle, unter diesen Silber und Kupfer. Leiter werden nicht durch Reibungsvorgänge geladen. Die Zufuhr oder Abgabe von Elektronen erfolgt durch Kontakt mit geladenen Körpern.

Durch Reibung von Kleidungsstücken mit anderen Stoffen wird die Körperoberfläche stark elektrisch geladen. Die rasche Entladung über einen Leiter, etwa eine Türklinke, ist unangenehm. An Isolatoren findet dabei keine Entladung statt.

Stoffe, in denen ein Elektronenfluß nur sehr schwer möglich ist, bezeichnet man als *Nichtleiter*, *Isolatoren* oder *Dielektrika*. Dazu gehören etwa Quarz, Bernstein, Hartgummi, viele Kunststoffe und Gase.
Neben Leitern und Nichtleitern gibt es noch die *Halbleiter*. Sie besitzen einen besonderen chemischen Aufbau und ermöglichen das Fließen der Elektronen unter bestimmten Voraussetzungen.

1.2 Coulombsches Gesetz

Zwei Stanniolkugeln, die an dünnen elastischen Fäden hängen, werden gleichnamig geladen. Wie bereits aus Versuchen bekannt, erfolgt eine gegenseitige Abstoßung. Es tritt also eine Wechselwirkung auf.
Wovon hängt die Kraftwirkung zwischen zwei Ladungen Q_1 und Q_2 ab?
Zur Ermittlung einer Gesetzmäßigkeit führen wir vorerst eine Idealisierung durch. Die beiden Kugeln werden als *punktförmige Ladungen* betrachtet.
Erhöht man etwa Q_1, erfolgt eine größere Abstoßung. Dies bedeutet:

(1) $F \sim Q_1 \cdot Q_2$

Beachte:
Aufgrund des Wechselwirkungsgesetzes bewirkt eine auf einen Körper wirkende Kraft eine gleich große Gegenkraft. Die Kräfte auf beide Ladungen sind gleich groß, auch wenn Q_1 und Q_2 verschieden sind.
Weiters zeigt sich, daß bei Verdoppelung des Abstandes die Kraftwirkung auf ein Viertel, beim dreifachen Abstand auf ein Neuntel sinkt.
Daher gilt:

(2) $F \sim \frac{1}{r^2}$

Aus (1) und (2) erhält man folgende Formel:

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Der Proportionalitätsfaktor k hat den Wert $\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$.

ε_0 heißt *Dielektrizitätskonstante* des Vakuums, *Influenzkonstante* oder *elektrische Feldkonstante*.

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$ *Coulombsches Gesetz* für 2 Punktladungen

Die Kraft F heißt *Coulombkraft*.

Beispiel A

Zwei punktförmige Ladungen $Q_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ As und $Q_2 = 5 \cdot 10^{-5}$ As sind 20 cm voneinander entfernt und üben eine Kraft von 224,7 N aufeinander aus. Berechne die Dielektrizitätskonstante.

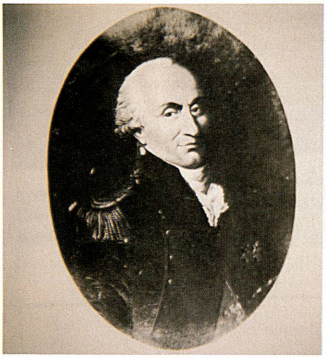
$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 F}$$

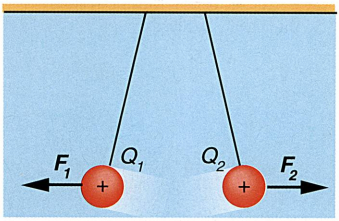
$$\varepsilon_0 = \frac{2 \cdot 10^{-5}\,\text{As} \cdot 5 \cdot 10^{-5}\,\text{As}}{4\pi \cdot (0{,}2\,\text{m})^2 \cdot 224{,}7\,\text{N}}$$

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,\text{A}^2\,\text{s}^2/\text{N}\,\text{m}^2$$

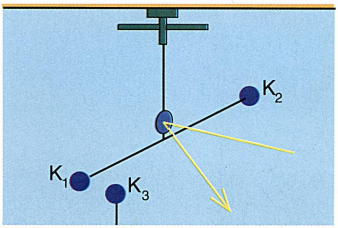
Der genaue Wert von ε_0 beträgt $8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\text{A}^2\text{s}^2/\text{N}\,\text{m}^2$.



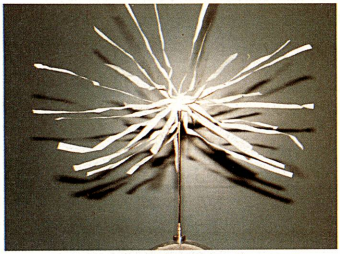
7.1 *Charles Augustin Coulomb* (1736 – 1806), französischer Physiker, dessen quantitative Untersuchungen in der Elektrostatik zur Entdeckung des nach ihm benannten Gesetzes führten.



7.2 Sind die Ladungen ungleichnamig, weisen die beiden Kraftvektoren aufeinander, sind sie gleichnamig, weisen sie voneinander weg.



7.3 Coulombsche Drehwaage. So hat Coulomb das nach ihm benannte Gesetz gefunden: An einem sehr dünnen Metallfaden hängt ein dünner Stab aus einem nicht leitenden Material. An seinen beiden Enden sind zwei gleiche Metallkugeln K_1 und K_2 befestigt. Eine dritte gleichartige Kugel K_3 auf einem Stativ wird elektrisch geladen. Durch Verdrehung des Torsionsknopfes erreicht man, daß K_1 und K_3 einander gerade berühren. K_3 gibt dabei die Hälfte ihrer Ladung an K_1 ab. Die Coulombschen Kräfte bewirken nun, daß die beiden Kugeln einander abstoßen: Die Waage verdreht sich. Der entsprechende Drehwinkel ist ein Maß für die Kraft F. Ferner mißt man den Abstand r zwischen beiden Kugelmittelpunkten. Nun wird eine der beiden Kugeln durch Erdung entladen. Bei neuerlicher Berührung wird die restliche Ladung wieder auf beide Kugeln verteilt. (Nun sind die Ladungen der beiden Kugeln nur noch halb so groß.) Wieder werden die Kraft F und der Abstand r gemessen. Man erhält eine Serie von Meßdaten, aus denen das Coulombsche Gesetz gefolgert werden kann.



8.1 Die gleichnamig geladenen Papierstreifen stoßen sich gegenseitig ab.

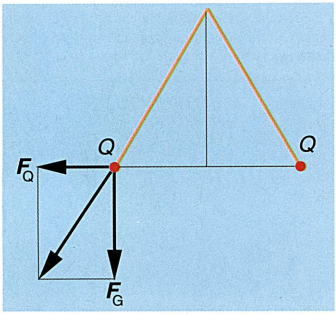
Beispiel C

Die elektrischen Ladungen zweier Metallkugeln betragen je 1 C, der Abstand von Kugelmittelpunkt zu Kugelmittelpunkt 1 m. Wie groß ist die Coulombsche Kraft F, welche die beiden Kugeln wechselweise aufeinander ausüben?

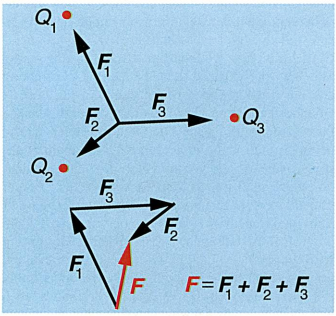
$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \wedge Q_1 = Q_2 = 1\text{ C} \wedge$$

$$\wedge\ r = 1\text{ m} \Rightarrow$$

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}}\text{ N} \approx 8{,}99 \cdot 10^{9}\text{ N}$$



8.2 Abbildung zu Aufgabe 4



8.3 Superposition: Die resultierende Kraft ist die Vektorsumme der Einzelkräfte.

Beispiel B

Zwei kleine Kugeln mit dem Mittelpunktsabstand 15 cm besitzen gleich große Ladung. Sie üben eine Kraft von 220 N aufeinander aus. Berechne die Ladungen.

(1) $F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$ (2) $Q_1 = Q_2 = Q$.

(1), (2) $Q^2 = 4\pi\varepsilon_0 r^2 F \Rightarrow Q = 2r\sqrt{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot F}$

$$Q = 2 \cdot 0{,}15\text{ m} \cdot \sqrt{\pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\text{ A}^2\text{ s}^2\text{ N}^{-1}\text{ m}^{-2} \cdot 220\text{ N}}$$

$$Q = 2{,}35 \cdot 10^{-5}\text{ A s}$$

Die Ladungen betragen jeweils $2{,}35 \cdot 10^{-5}$ As.

Mit Hilfe des Coulombschen Gesetzes läßt sich die Einheit der Ladung festlegen (vgl. auch Beispiel C in der Randspalte!):

1 Coulomb (1 C) ist jene Ladungsmenge, die auf eine gleich große Ladung in einer Entfernung von einem Meter eine Kraft von $8{,}99 \cdot 10^{9}$ N ausübt.

Elektrostatische Kräfte treten auch in den Atomen auf, Protonen und Elektronen ziehen einander aufgrund dieser Kräfte an. Die Gravitationskraft ist in diesem Bereich völlig vernachlässigbar. Atome besitzen eine gleich große Anzahl von negativen und positiven Ladungen, in Summe gesehen ist ihre elektrostatische Wirkung Null. Atome sind nach außen hin elektrisch neutral.

Im atomaren Bereich sind neben Coulombschen noch sogenannte *Kernkräfte* wirksam. Sie sind die Ursache dafür, daß Atomkerne nicht zerfallen, obwohl die gleichnamigen Ladungen der Protonen einander abstoßen.

Aufgaben

1. Zwei gleich große positive Ladungen sind 10 cm voneinander entfernt. Wie groß sind die Ladungen, wenn sie eine Kraft von 0,03 N aufeinander ausüben? Welche Kraft üben diese Ladungen in 5 cm Abstand aufeinander aus?

2. In die Mitte zweier gleich großer Ladungen wird eine dritte Ladung gebracht. Wie groß ist die Kraft der beiden Ladungen auf diese Ladung?

3. Berechne die Gravitationskraft und die Coulombkraft zwischen dem Proton und dem Elektron im Wasserstoffatom, wenn deren Abstand $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m beträgt. In welchem Verhältnis stehen die beiden Kräfte?

4. Zwei Kugeln gleicher Masse (0,2 g) hängen an 30 cm langen Fäden und werden so gleichnamig geladen, daß sie gleich große Ladungen besitzen. Wie groß sind die Ladungen der Kugeln, wenn sie aufgrund der Abstoßung 8 cm voneinander entfernt sind? (Abb. 8.2)

1.3 Superpositionsprinzip

Versuch

Eine Stanniolkugel mit einer positiven Probeladung q wird in die Umgebung dreier Metallkugeln mit den negativen Ladungen Q_1, Q_2 und Q_3 gebracht. (Eine Probeladung ist eine sehr kleine Ladung gegenüber der zu untersuchenden Ladung; diese darf durch die Anwesenheit der kleinen Ladung nicht beeinflußt werden.)

Auf die Stanniolkugel wirken drei Kräfte (Abb. 8.3).

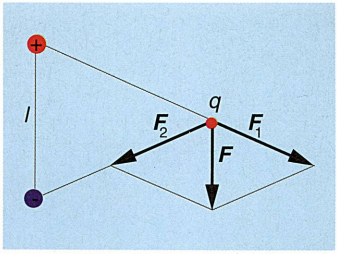
Die resultierende Kraft auf die Stanniolkugel ist die vektorielle Summe der Einzelkräfte, die zwischen der Stanniolkugel und den einzelnen Kugeln wirken. Man bezeichnet dies als *Superposition*.

Superpositionsprinzip: Sind mehrere Ladungen vorhanden, ergibt sich die Gesamtkraft, die auf eine Probeladung wirkt, als vektorielle Summe der Einzelkräfte zwischen der Probeladung und den einzelnen Ladungen.

Eine Anordnung einer positiven Ladung und einer negativen Ladung in einem kleinen Abstand wird als *elektrischer Dipol* bezeichnet.

Aufgabe

5. Drei punktförmige positive Ladungen ($Q_1 = 5 \cdot 10^{-6}$As, $Q_2 = 6 \cdot 10^{-6}$ As, $Q_3 = 7 \cdot 10^{-6}$As) sind so angeordnet, daß sie ein gleichseitiges Dreieck mit der Seitenlänge 12 cm bilden. Berechne die resultierende Kraft, welche von Q_1 und Q_2 auf Q_3 ausgeübt wird.



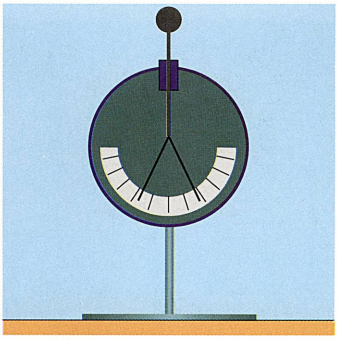
9.1 Die Kraft auf eine Probeladung unter dem Einfluß eines Dipols

1.4 Meßgeräte

Ein Meßgerät zum Nachweis von Ladungen heißt *Elektroskop*. Sollen quantitative Messungen durchgeführt werden, müssen die Elektroskope mit entsprechend kalibrierten Skalen versehen werden. Man bezeichnet derartige Meßgeräte dann als *Elektrometer*.

Blättchenelektroskop (Abb. 9.2)
Ein Metallstab befindet sich isoliert in einem Metallgehäuse. Am Ende des Stabes hängen zwei leicht bewegliche Metallblättchen. Berührt man das obere Ende des Metallstabes mit einem geladenen Körper, werden die Blättchen gleichnamig geladen und stoßen einander ab.

Braunsches Elektrometer (Abb. 9.3)
In diesem Gerät befindet sich am Metallstab eine drehbare Nadel. Wird das Elektroskop geladen, wird die Nadel vom gleichnamig geladenen Stab abgestoßen. Aus der Verdrehung der Nadel kann auf die Ladungsmenge geschlossen werden.



9.2 Blättchenelektroskop

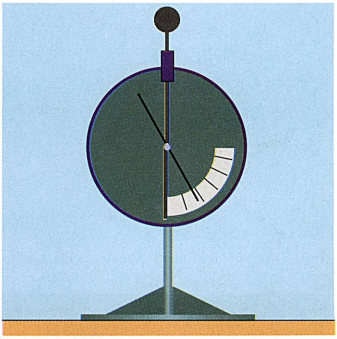
1.5 Das elektrische Feld

Wie können zwei geladene Körper eine Wechselwirkung aufeinander ausüben, obwohl keine sichtbare Verbindung zwischen ihnen gegeben ist?

Wie schon bei der Behandlung der Gravitation bedient man sich auch hier der Modellvorstellung eines *physikalischen Feldes* (vgl. Band 1, Seite 78). Untersucht man z. B. die Umgebung einer positiv geladenen Kugel mit einer positiven Probeladung, kann man jedem Punkt des Raumes einen *Kraftvektor* zuordnen (Abb. 9.4). Man erhält so ein *Vektorfeld*. Man sagt, die geladene Kugel ist von einem *elektrischen Feld* umgeben. Dieses beschreibt die Veränderungen, welche die Umgebung der Kugel durch die elektrische Ladung erfahren hat.

Das elektrische Feld einer ruhenden Ladung wird auch als *elektrostatisches Feld* bezeichnet.

Die Kraft auf die Probeladung wird durch das Feld vermittelt. Diese Vermittlung geht nach der modernen Feldtheorie mit Lichtgeschwindigkeit vor sich. Ändert man die Ladung der Kugel, so ändert sich das Feld mit einer bestimmten Verzögerung.

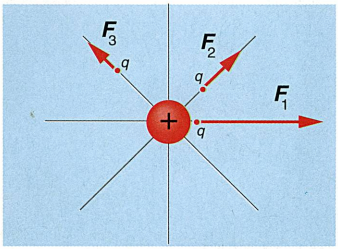


9.3 Braunsches Elektrometer

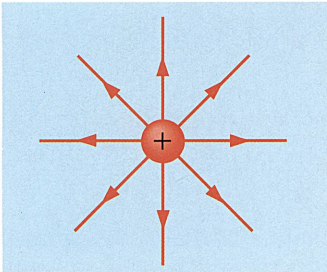
Das elektrische Feld ist eine Eigenschaft des Raumes, die durch die Kraft auf elektrische Ladungen gekennzeichnet ist.

Vektorfelder kann man durch *Feldlinienbilder* veranschaulichen. Den Abbildungen 10.1 und 10.2 kann man entnehmen:

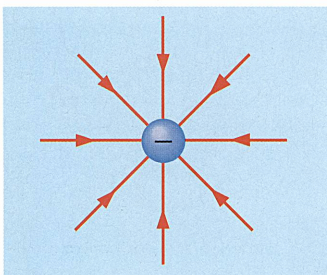
Ist ein Körper positiv geladen, gehen die Feldlinien von der Ladung weg, bei negativer Ladung weisen sie zur Ladung hin. Die Feldlinien stehen stets normal zur Leiteroberfläche.



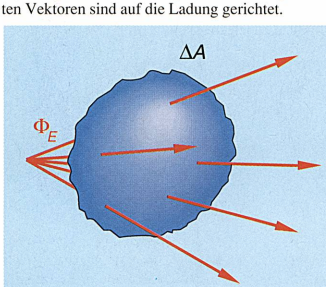
9.4 Die Umgebung einer geladenen Kugel wird mit einer Probeladung q "abgetastet".



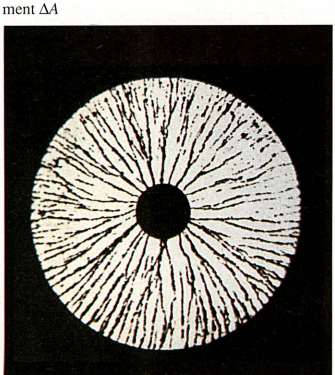
10.1 Positive Punktladung. Die radial angeordneten Vektoren weisen von der Ladung weg.



10.2 Negative Punktladung. Die radial angeordneten Vektoren sind auf die Ladung gerichtet.



10.3 Der elektrische Fluß Φ_E durch ein Flächenelement ΔA



10.4 Feldlinienbild eines Radialfeldes

Die elektrische Feldstärke, der elektrische Fluß

Wie groß die Kraft ist, die auf eine Probeladung q ausgeübt wird, hängt wesentlich auch davon ab, wie groß die Probeladung selbst ist. (So wie es auch von der "Probemasse" abhängt, welche Kraft im Gravitationsfeld auf sie wirkt.) Eine nicht näher definierte Probeladung ist daher zur quantitativen Beschreibung eines elektrischen Feldes ungeeignet. Wir lösen dieses Problem, indem wir eine neue Größe einführen: die *elektrische Feldstärke* $\boldsymbol{E}$.

Elektrische Feldstärke $\boldsymbol{E}$

$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}}{q} \qquad E = \frac{F}{q} \qquad [E] = 1\ \mathrm{N} / 1\ \mathrm{As}$$

Da die Kraft $\boldsymbol{F}$ ein Vektor ist, gilt dies auch für $\boldsymbol{E}$. Es ist unmittelbar einzusehen, daß $\boldsymbol{E}$ unabhängig ist von der Größe der positiven Probeladung q. Dazu ein Beispiel:

➤ Beispiel A

Wie groß ist die Feldstärke E einer Punktladung Q im Abstand r ?

(1) $E = \dfrac{F}{q}$ (2) $F = \dfrac{Q\,q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2}$

(1), (2) $E = \dfrac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2}$

Die Feldlinien eines elektrischen Feldes geben die Richtung der elektrischen Feldstärke an. Weiters setzt man fest, daß die Feldliniendichte proportional zur Feldstärke ist. Doppelte Feldstärke bedeutet somit doppelte Anzahl von Feldlinien, die ein bestimmtes zu den Feldlinien normales Flächenstück durchsetzen. Das Produkt aus Feldstärke E und dem Flächeninhalt ΔA liefert eine weitere Größe, die der Beschreibung eines Feldes dient, den elektrischen Fluß oder Kraftfluß Φ_E: $\Phi_E = E \cdot \Delta A$ (Abb.10.3).

➤ Beispiel B

Wie groß ist der Fluß durch eine Kugeloberfläche, der von einer Punktladung Q im Mittelpunkt der Kugel erzeugt wird? Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Ladung Q und dem elektrischen Fluß Φ_E ?

Durch gleich große Flächenelemente geht die gleiche Anzahl von Feldlinien. Der gesamte Fluß ist somit $\Phi_E = E \cdot 4\,r^2\,\pi$. Daraus und aus $E = \dfrac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2}$ folgt:

$$\Phi = \frac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r^2} \cdot 4\,\pi\,r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

In dieser Beziehung kommt der Abstand von der Ladung nicht vor. Daher kann man sich die Ladung einer Metallkugel in einem Punkt vereinigt denken.

$Q = \varepsilon_0 \cdot \Phi_E$ *Grundgleichung der Elektrostatik*

Der elektrische Fluß durch die geschlossene Fläche ist proportional zur Ladung.

Das elektrische Feld der Kugel wird als *radiales Feld* bezeichnet. Die Feldlinien eines solchen Feldes können durch folgenden Versuch veranschaulicht werden.

Einige Feldlinienbilder

Versuch (Abb. 10.4)

Auf die Unterseite einer Glasplatte wird ein Metallscheibchen geklebt, auf die Oberseite werden Gips- oder Kunststoffteilchen gestreut. Wird nun das

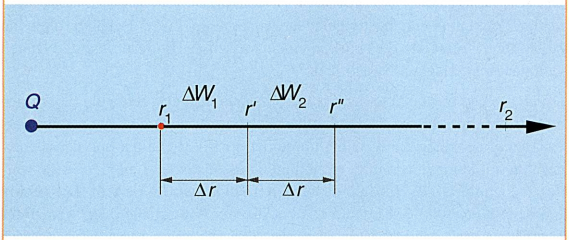
Scheibchen geladen, richten sich die Teilchen aus. Man erhält ein Feldlinienbild.

In Abbildung 11.1 ist das Feldlinienbild zweier ungleichnamiger, gleich großer Punktladungen dargestellt. Die Feldlinien sind gekrümmt. Die Feldstärkevektoren sind in diesem Fall Tangenten der Feldlinien. Die Abbildungen 11.2 bis 11.4 stellen weitere besondere Feldlinienbilder dar.

1.6 Arbeit im elektrischen Feld

➤ **Beispiel A:** *Arbeit im elektrischen Feld einer Punktladung*

Wie groß ist die Arbeit W, die verrichtet werden muß, wenn man eine Probeladung q im Feld einer negativen Punktladung Q von r_1 nach r_2 befördert?



Da die Kraft in einem Radialfeld eine vom Ort abhängige Größe ist, kann sie nicht als Konstante betrachtet werden.

Soll die Ladung q im Feld der Ladung Q von r_1 bis r_2 bewegt werden, zerlegt man die Distanz $r_2 - r_1$ in kleine Teilstrecken von der Länge Δr. In einem so kleinen Intervall darf die Coulombkraft als konstant angesehen werden. Das bedeutet, daß man die veränderliche Größe r durch einen Mittelwert ersetzen darf. Man wählt das geometrische Mittel:

(1) $r = \sqrt{r_1 r'} \quad \Leftrightarrow \quad r^2 = r_1 r'$ u.s.w.

(2) $\Delta W_1 = F_1 \cdot \Delta r = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0 r_1 r'} \cdot Q\,q \cdot (r' - r_1) = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot Q\,q\,(\dfrac{1}{r_1} - \dfrac{1}{r'})$

Für weitere Teilstrecken gilt:

$$\Delta W_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot Q\,q \cdot (\frac{1}{r'} - \frac{1}{r''})$$

$$\Delta W_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot Q\,q \cdot (\frac{1}{r''} - \frac{1}{r'''})$$

...

Die Summe aller ΔW_i zwischen r_1 und r_2 liefert dann:

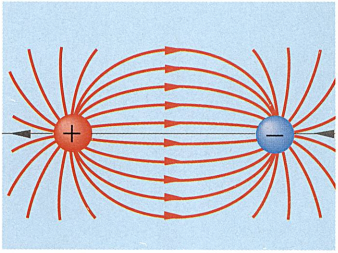
$$W = \sum \Delta W_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} Q\,q\,(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r'} + \frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \cdots - \frac{1}{r_2})$$

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} Q\,q\,(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$$

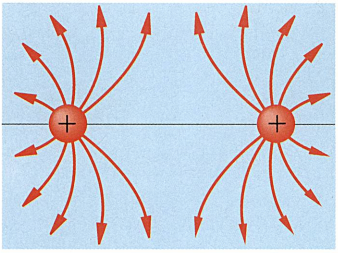
Mit Hilfe der Integralrechnung läßt sich die Arbeit rascher berechnen:

$$W = \int_{r_1}^{r_2} F(r)\,dr = \frac{Q\,q}{4\pi\varepsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \left[\frac{Q\,q}{4\pi\varepsilon_0}(-\frac{1}{r})\right]_{r_1}^{r_2} =$$

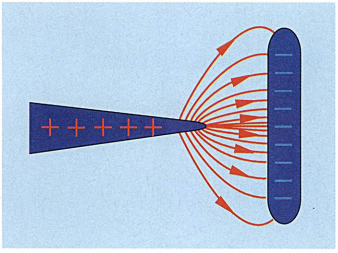
$$= \frac{Q\,q}{4\pi\varepsilon_0}(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$$



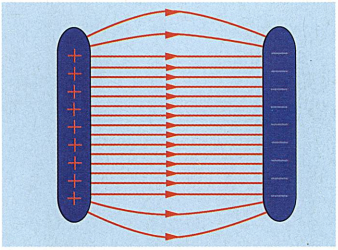
11.1 Feldlinienbild zweier ungleichnamiger Punktladungen



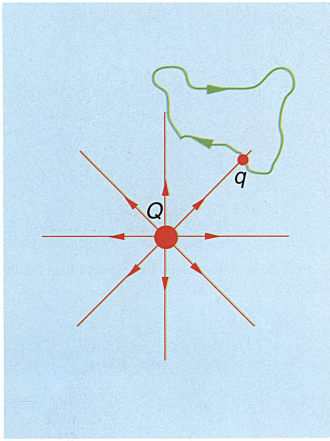
11.2 Feldlinienbild zweier gleichnamiger Punktladungen



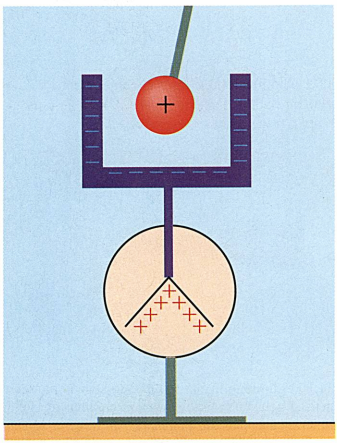
11.3 Feldlinienbild einer Spitze und einer entgegengesetzt geladenen Platte. Man erkennt aus der Feldliniendichte, daß die Feldstärke an der Spitze sehr groß ist. Diese Eigenschaft wird als *Spitzenwirkung* bezeichnet. An einer Spitze können Elektronen aus einem Metall austreten.



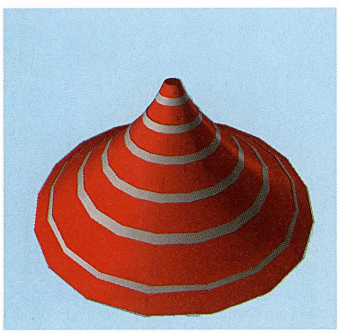
11.4 Die zwei entgegengesetzt geladenen Platten liefern ein Feldlinienbild mit parallelen Feldlinien. Man nennt dieses Feld *homogen*. Eine solche Anordnung der Platten wird als *Kondensator* bezeichnet. Die Feldliniendichte eines homogenen Feldes ist konstant.



12.1 Abbildung zu Beispiel B



12.2 Aufladung des Elektroskops durch Influenz



12.3 Veranschaulichung des Begriffes "Potential" anhand des radialsymmetrischen Feldes einer positiven Punktladung Q

Beispiel B

Berechne die Arbeit, die erforderlich ist, um eine Probeladung q im elektrischen Feld der Ladung Q zu bewegen, wobei Anfangs- und Endpunkt zusammenfallen sollen (Abb. 12.1). Reibungsverluste werden dabei vernachlässigt.

$$W = \frac{Q\,q}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \;\wedge\; r_1 = r_2 \;\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\; W = \frac{Q\,q}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \cdot 0 = 0$$

Die Arbeit bei einem geschlosssenen Umlaufweg ist gleich Null.

1.7 Influenz

Versuch (Abb. 12.2)

Auf einem ungeladenen Elektroskop wird ein oben offener Metallbehälter befestigt. Senkt man eine postiv geladene Metallkugel in den Behälter, ohne ihn zu berühren, zeigt das Elektroskop einen Ausschlag. Entfernt man die Kugel, geht der Ausschlag auf Null zurück.

Durch das elektrische Feld der positiv geladenen Kugel werden die Elektronen des Bechers angezogen. Dadurch bildet sich auf der anderen Seite des Bechers ein Elektronenmangel aus. Die Summe der positiv gezählten und der negativ gezählten Ladungen ist auf dem anfänglich ungeladenen Leiter Null, sie werden jedoch durch den Einfluß des äußeren Feldes anders verteilt. Die positiv geladene Unterseite des Behälters zieht die frei beweglichen Elektronen des Metallstabs und der Metallblättchen des Elektroskops an, wodurch sich das Elektroskop positiv auflädt.

Influenz ist die Trennung von Ladungen mit Hilfe eines elektrischen Feldes.

1.8 Potential

Durch die Angabe der Feldstärke in den einzelnen Punkten eines elektrischen Feldes ist dieses vollständig beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit, die Wirkungen einer Ladung zu beschreiben, ist die Betrachtung der Arbeit, die verrichtet wird, wenn man eine positive Probeladung (sie darf das Feld nicht merklich verändern) in ihrem Feld verschiebt.

Bringt man in das Feld einer positiv geladenen Kugel (Q) einen sehr kleinen, leicht beweglichen Körper mit der positiven Ladung q, wird dieser bis an die Grenze des Feldes fortgestoßen (theoretisch bis ins "Unendliche"). Dabei wird Arbeit vom System verrichtet, sie wird *negativ* gezählt. Genau die gleiche Arbeit muß zugeführt werden, wenn man diese Ladung aus dem Unendlichen an einen bestimmten Punkt des Feldes befördert. Ist die felderzeugende Ladung negativ, jedoch betragsmäßig gleich groß, muß Arbeit zugeführt werden, um die positive Probeladung ins Unendliche zu bewegen. Diese Arbeit wird *positiv* gezählt.

Daraus ist zu ersehen, daß die Ladung q in jedem Punkt eines elektrischen Feldes die Fähigkeit besitzt, Arbeit zu verrichten, d. h. sie besitzt *potentielle Energie*. Von dieser Tatsache ausgehend kann der Begriff des *Potentials* festgelegt werden:

Jedem Punkt eines elektrischen Feldes kann sein elektrisches Potential V zugeordnet werden. Man versteht darunter jene Arbeit, die aufgewendet werden muß, um die positive Ladungseinheit (1 C) aus dem Unendlichen an diesen Punkt zu bringen. Formelmäßig:

$$V = \frac{W}{q} \qquad [V] = 1\ \mathrm{J} / 1\ \mathrm{C} = 1\ \mathrm{Volt}\ (1\ \mathrm{V})$$

➤ Beispiel A

Wie groß ist das Potential eines Punktes im Abstand r einer positiven (negativen) Punktladung Q ?

(1) $V = \frac{W}{q}$ (2) $W = \frac{Q\,q}{4\,\pi\,\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

(3) Da r_2 "unendlich" weit entfernt liegt, strebt der Bruch $\frac{1}{r_2}$ gegen Null.

(1), (2), (3) $V = \frac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \cdot \frac{1}{r_1}$ Anstelle r_1 schreiben wir kurz r :

$$V = \frac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r}$$

Ist die felderzeugende Ladung positiv, wird das Potential positiv gezählt, da Arbeit am System geleistet wird. Anderenfalls ist es negativ, da das System Arbeit verrichtet.

Äquipotentialflächen

Aus obiger Formel erkennt man, daß Punkte, die von der Ladung Q den gleichen Abstand r besitzen, gleiches Potential besitzen. Man bezeichnet die dadurch beschriebene Kugelfläche als *Äquipotentialfläche* (Abb. 13.3). Bewegt man eine Ladung auf einer Äquipotentialfläche, wird keine Arbeit verrichtet.

Die elektrische Spannung

Besitzt ein beliebiger Punkt A einer bestimmten Äquipotentialfläche das Potential V_1 und ein Punkt B einer anderen Äquipotentialfläche das Potential V_2, so herrscht zwischen diesen beiden Punkten die *Potentialdifferenz* $V_1 - V_2$ (Abb. 13.4). Statt Potentialdifferenz sagt man auch *Spannung U:* $U = V_1 - V_2$

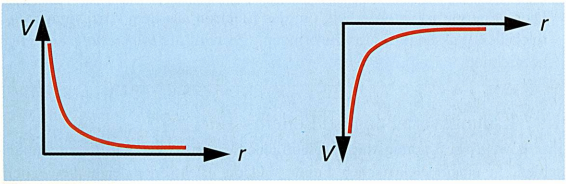
Welche Arbeit W wird verrichtet, wenn man die Ladung q von B nach A befördert? Transportiert man q aus dem Nullniveau nach A, verrichtet man die Arbeit $W_1 = q \cdot V_1$, transportiert man sie nach B, verrichtet man die Arbeit $W_2 = q \cdot V_2$. Daraus folgt: $W = W_1 - W_2 = q\,(V_1 - V_2) = q\,U$

Der Formel $W = q\,U$ kann man entnehmen, daß die Arbeit von der Potentialdifferenz abhängt, nicht jedoch von der Wahl des Nullniveaus.

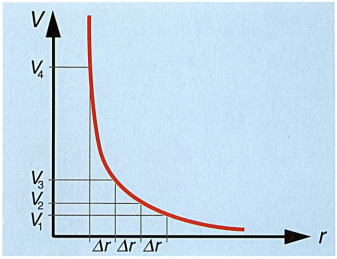
Die Potentialdifferenz, die zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes herrscht, wird als *elektrische Spannung U* bezeichnet.
$[U] = [V] = 1$ V

Ein frei bewegliches Teilchen mit der positiven Ladung q wird in einem Feld der Ladung $+\,Q$ abgestoßen, es verringert sein Potential (Abb.13.1 links). Im Feld der Ladung $-\,Q$ wird es angezogen. Es wird dabei wieder von Flächen höheren Potentials ($V = -\,Q\,/\,4\,\pi\,\varepsilon_o\,r$) auf Flächen niedrigeren Potentials gedrängt (Abb. 13.1 rechts).

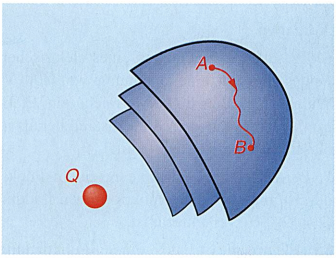
Eine Potentialdifferenz bewirkt Ladungsbewegungen. Positive Ladungen werden von Stellen höheren zu solchen geringeren Potentials transportiert.



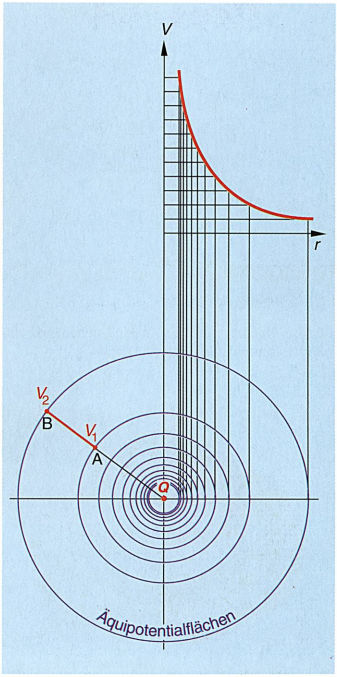
13.1 Bei zwei gleichnamigen Ladungen steigt das Potential bei Annäherung an (links), bei zwei ungleichnamigen Ladungen sinkt das Potential bei Annäherung ab (rechts).



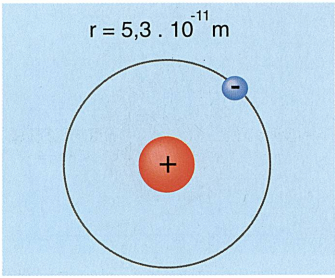
13.2 Zusammenhang zwischen V und r im Feld einer positiven Punktladung Q



13.3 Bewegt man eine Ladung auf einer Äquipotentialfläche, wird keine Arbeit verrichtet.



13.4 Zwischen den beiden Punkten A und B herrscht die Spannung $U = V_1 - V_2$.



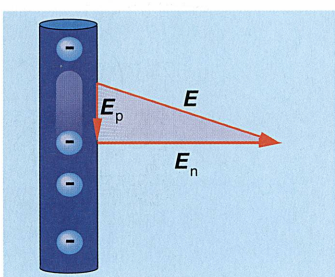
14.1 Abbildung zu Beispiel C

Aufgaben

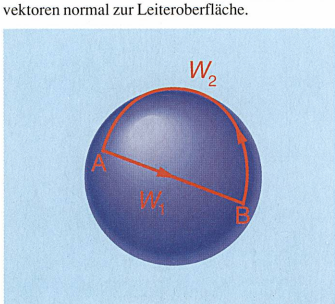
6. Zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes herrscht eine Spannung von 800 V. Welche Geschwindigkeit erreicht ein Elektron, wenn es aus dem Ruhezustand heraus in diesem Feld beschleunigt wird?

7. Berechne die Feldstärke in einem Punkt, der 10 mm von einer punktförmigen Ladung $Q = 12 \cdot 10^{-8}$ As entfernt ist.

8. Elektrisches Feld einer Punktladung (Q = 1 As). Zeichne ein Diagramm, welches die Abhängigkeit der Feldstärke von der Entfernung darstellt.



14.2 Bei einem stationären Zustand stehen die Feldvektoren normal zur Leiteroberfläche.



14.3 Herrschte im Inneren des Leiters ein elektrisches Feld, dann wäre $W_1 \neq 0$. Da $W_2 = 0$, ergäbe dies einen Widerspruch zum Energieerhaltungssatz.

➤ Beispiel B

Ein Elektron ($q = e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As, $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg) durchläuft eine Potentialdifferenz von 1 V.

a) Wie groß ist die kinetische Energie des Elektrons?

Wenn das Elektron eine bestimmte Potentialdifferenz U durchläuft, wird an ihm eine Beschleunigungsarbeit W verrichtet.

$W = e \cdot U = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As $\cdot$ 1 V $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

Diese Beschleunigungsarbeit entspricht der kinetischen Energie des Elektrons: $E_{kin} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J. Für diese Größenordnungen verwendet man eine handlichere Einheit, das *Elektronvolt* (eV). 1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

b) Berechne die Geschwindigkeit des Elektrons!

$$E_{kin} = \frac{m_e v^2}{2} \Leftrightarrow v = \sqrt{\frac{2E_{kin}}{m_e}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} \approx 5{,}93 \cdot 10^5\ \text{m/s}$$

Die Bewegungsenergie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 V erlangt, heißt 1 Elektronvolt (1 eV). 1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J

Beispiel C (Abb. 14.1)

Nach dem Bohrschen Atommodell für das Wasserstoffatom kreist ein Elektron im Abstand von $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m um den Atomkern.

a) Berechne die kinetische Energie des Elektrons.

Die Coulombkraft F_c, die der positiv geladene Kern auf das Elektron ausübt, ist die Zentripetalkraft F_z, welche das Elektron auf die Kreisbahn zwingt:

$$(1)\ F_c = F_z \quad (2)\ F_c = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \quad (3)\ F_z = \frac{m_e v^2}{r} \quad (4)\ E_{kin} = \frac{m_e v^2}{2}$$

$$(1)-(4)\ E_{kin} = \frac{F_z r}{2} = \frac{F_c r}{2} = \frac{e^2 r}{8\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r} =$$

$$= \frac{(1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{As})^2}{8\pi \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \text{As N}^{-1}\ \text{m}^{-2} \cdot 5{,}3 \cdot 10^{-11}\ \text{m}} = 2{,}17 \cdot 10^{-18}\ \text{J} = 13{,}6\ \text{eV}$$

b) Berechne die potentielle Energie des Elektrons.

$$E_{pot} = W = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = -2\,E_{kin} = -27{,}2\ \text{eV}$$

Das negative Vorzeichen besagt, daß Arbeit vom System verrichtet wird.

c) Wie groß ist die Gesamtenergie E?

$E = E_{kin} + E_{pot} = -13{,}6$ eV

Diese Energie ist erforderlich, um das Elektron aus dem Anziehungsbereich des Wasserstoffkerns zu bringen. Sie wird als *Ionisierungsenergie* bezeichnet.

1.9 Ladungsverteilung bei Leitern

Frei bewegliche Ladungsträger folgen jedem noch so kleinen Potentialunterschied. In einem elektrischen Leiter sind die Elektronen leicht beweglich. Überträgt man auf eine ungeladene Metallkugel negative Ladung, bildet sich in einem bestimmten Bereich der Kugel eine Überschußladung aus. Die Elek-

tronen stoßen einander nun so weit wie möglich ab, sie werden an die Oberfläche getrieben. Die Ladungsträger können sich nur noch längs der Oberfläche bewegen. Dies findet so lange statt, bis schließlich das Innere des Körpers ladungsfrei ist. Es ist dann ein stationärer Zustand erreicht.

Die Leiteroberfläche selbst ist dann eine Äquipotentialfläche, auf welcher die Feldvektoren senkrecht stehen. Stünde einer der Feldvektoren $\boldsymbol{E}$ nicht normal zur Leiteroberfläche, könnte er in zwei Komponenten $\boldsymbol{E}_p$ und $\boldsymbol{E}_n$ zerlegt werden (Abb. 14.2). Die parallele Komponente $\boldsymbol{E}_p$ würde eine Verschiebung der Ladungen an der Oberfläche bewirken. Damit wären keine elektrostatischen (ruhenden) Verhältnisse der Ladungen gegeben.

Das Innere eines geladenen Körpers im stationären Zustand ist feldfrei. Wäre dies nicht der Fall, könnte ein Elektron so von einem Punkt A zu einem anderen Punkt B bewegt werden, daß ein Arbeitsgewinn möglich wäre. Entlang der Oberfläche (Äquipotentialfläche) ließe sich dann die Ladung ohne Arbeit an den Ausgangspunkt zurückbringen. Dies wäre jedoch ein Perpetuum mobile und widerspräche dem Energieerhaltungssatz (Abb. 14.3).

Das Innere eines geladenen Leiters ist feldfrei. Die Feldlinien verlaufen senkrecht zur Leiteroberfläche; sie entspringen und münden in den Ladungen auf der Leiteroberfläche.

Beachte: Bei bewegten elektrischen Ladungen (stromdurchflossener Leiter) tritt sehr wohl ein elektrisches Feld im Leiterinneren auf.

Versuch (Abb. 15.1)

Eine isolierte Metallkugel A wird geladen und dann mit den beiden Halbkugeln B und C, die an isolierten Griffen befestigt sind, berührend umschlossen. Dadurch bildet die Kugel mit den beiden Halbkugeln einen einzigen Leiter. Nimmt man nun die beiden Halbkugeln wieder ab, stellt man fest, daß A ungeladen, aber die Halbkugeln B und C geladen sind. Der Versuch zeigt, daß sich Ladung nur an der Oberfläche eines Leiters verteilt.

Erdung

Da die Erde aus Stoffen aufgebaut ist, die eine mittlere elektrische Leitfähigkeit aufweisen, werden auftretende Potentialdifferenzen sofort ausgeglichen. Die Erdoberfläche kann daher als Äquipotentialfläche betrachtet werden. Elektrische Geräte, die mit der Erde leitend verbunden sind, bezeichnet man als *geerdet* (Abb. 15.2). Im "Normalfall" ist die Potentialdifferenz zwischen einem geerdeten Gerät und der Erde Null. (Bei einem defekten Gerät muß dies nicht immer zutreffen – Näheres dazu im Kap. 5.7.)

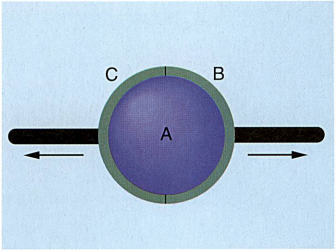
Das elektrische Feld der Erde

Die Erde ist bis in eine Höhe von etwa 60 km, dies ist die Untergrenze der Ionosphäre, von einem elektrischen Feld umgeben. Da die Erde ein elektrischer Leiter ist, stehen die Feldlinien senkrecht zur Erdoberfläche. Die Potentialdifferenz hängt sehr stark von der Wettersituation ab. Die Spannungsdifferenz pro Meter beträgt in Bodennähe bei Schönwetter 130 V/m, bei Gewitter bis zu 450 000 V/m. Obwohl Luft ein guter Isolator ist, fließt aufgrund der vorhandenen Ionen dauernd ein Strom. Die Hochatmosphäre bildet dabei den Pluspol, und die Erdoberfläche den Minuspol. Die Potentialdifferenz wird durch tausende Gewitter täglich aufrechterhalten. Anderenfalls würde das elektrische Feld zusammenbrechen.

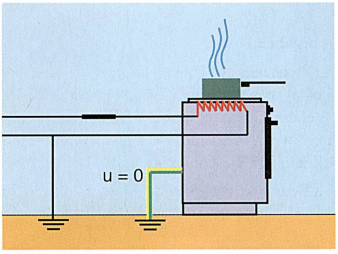
1.10 Anwendungen

Bandgenerator (Abb. 15.3)

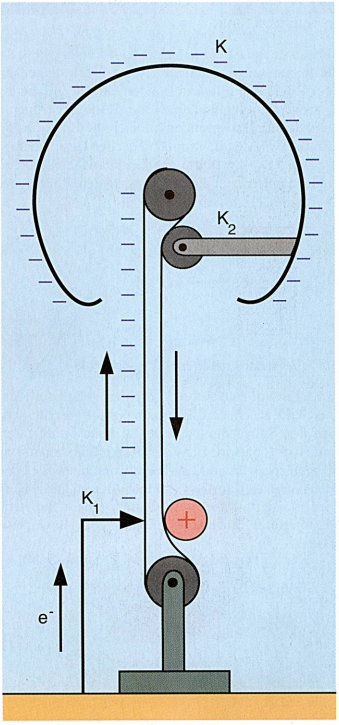
Der Bandgenerator wurde von *Van de Graaff* 1931 erfunden. Der wesentliche Teil ist ein Endlosband aus Gummi, welches über zwei Walzen läuft. Die obere Walze ist aus Kunststoff, die untere besteht aus Metall und wird mit einem Motor angetrieben. Der Oberteil des Endlosbandes befindet sich unter einer isolierten Metallhohlkugel, Konduktor (K) genannt. Dicht neben dem Band



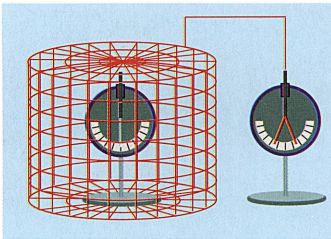
15.1 Dieser Versuch zeigt, daß sich Ladung nur an der Oberfläche eines Leiters verteilt.



15.2 Die Potentialdifferenz zwischen dem geerdeten Elektrogerät und der Erde ist Null.

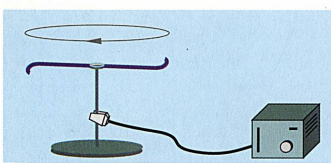


15.3 Schemadarstellung eines Bandgenerator

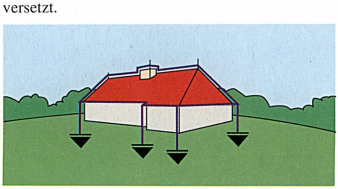


16.1 Faradayscher Käfig

16.2 *Michael Faraday* (1791 – 1867), englischer Physiker und Chemiker. Der junge Faraday besuchte neben seiner Buchbinderlehre Vorlesungen an der Royal Institution in London, an der er dann als Assistent aufgenommen wurde. Seine Experimente und deren Auswertungen bildeten die Basis für die Entdeckung der elektromagnetischen Gesetzmäßigkeiten. Faraday führte zur Erklärung elektrischer und magnetischer Erscheinungen den Begriff der Feldlinien ein.



16.3 Ein um eine Achse D drehbar gelagerter Körper wird an ein Hochspannungsgerät geschlossen. An den Spitzen treten dabei so hohe Felddichten auf, daß Elektronen aus dem Metall austreten, um den Körper zu entladen. Die austretenden Elektronen lagern sich an den Luftmolekülen an, diese werden ionisiert. Dabei wird ähnlich einem Raketenmotor durch Rückstoß der Körper in Bewegung versetzt.



16.4 Schema einer Blitzschutzanlage

befindet sich ein Kamm K_1. Läuft das Band, erfolgt aufgrund der Reibung mit der oberen Walze eine Ladungstrennung (Reibungselektrizität). Ist das Band elektrisch positiv geladen, werden beim Vorbeistreichen an dem geerdeten Metallkamm Ladungen entgegengesetzten Vorzeichens – also Elektronen – angezogen. Diese werden am oberen Kamm K_2, der mit dem Konduktor verbunden ist, wieder abgegeben und verteilen sich an der Kugeloberfläche. Mit Hilfe von Bandgeneratoren können sehr hohe Spannungen (einige MV) erzeugt werden.

Faradayscher Käfig

Versuch

Ein *Faradayscher Käfig* ist ein Zylinder aus Metallgeflecht, der gegenüber der Erde isoliert ist (Abb. 16.1). Ein im Inneren des Käfigs befindliches Elektroskop zeigt keinen Ausschlag. Das Elektroskop an der Außenseite des Zylinders zeigt an, daß eine Ladung vorhanden ist. Die Tatsache, daß das Innere eines Leiters feldfrei ist, gilt auch für Hohlräume, die von leitendem Material umschlossen sind. Dabei ist es nicht erforderlich, daß die Hülle geschlossen ist, oft reicht ein Drahtgeflecht.

Diese Tatsache wird dazu benützt, elektrische Geräte gegen äußere elektrische Felder zu schützen. Man umgibt sie mit einer metallischen Hülle, welche geerdet ist.

Eine weitere Anwendung des Faradaykäfigs findet sich in Blitzschutzanlagen von Gebäuden (Abb. 16.4). Zu diesem Zweck werden alle Metallaußenteile eines Hauses (Dachrinnen, Schluchtenbleche usw.) leitend miteinander verbunden und über Leitungen an den Außenwänden mit der Erde bzw. mit dem sogenannten Fundamenterder verbunden. Diese Metallhülle bildet somit eine Äquipotentialfläche aus. An den höchsten Punkten des Daches befinden sich Metallspitzen als sogenannte Blitzableiter. Bei Gewittern entstehen große elektrische Potentialdifferenzen in der Atmosphäre. Wegen der hohen Feldstärken an Spitzen wandern die Ionen zu den Blitzableitern. Der Erfinder des Blitzableiters ist *Benjamin Franklin*.

Elektrostatische Reinigung

Die elektrostatische Reinigung dient zur Entfernung von Staubteilchen mit Hilfe eines elektrischen Hochspannungsfeldes.

Die festen Teilchen werden an der sogenannten Sprühelektrode negativ geladen und dann von der positiv geladenen Niederschlagselektrode angezogen, entladen und abgeschieden.

Man bezeichnet diese Apparaturen auch als *Elektrofilter* (Abb. 17.1). Sie dienen zur Entstaubung von Rauchgasen, Rückgewinnung von Metallverbindungen aus Abgasen und dgl.

1.11 Kondensator

Versuch

Ein Plattenkondensator soll geladen werden. Zu diesem Zweck wird eine Platte mit einem Hochspannungsgerät verbunden, die andere geerdet (Abb. 17.2). Erhält die eine Platte etwa positive Ladung, erfolgt aufgrund des elektrischen Feldes auf der anderen Platte eine Ladungstrennung. Die Platteninnenseite weist dann einen Elektronenüberschuß, die Außenseite einen Elektronenmangel auf. Da die Platte geerdet ist, können Elektronen von der Erde "angesaugt" werden, sodaß die zweite Platte dann negativ geladen ist.

Wie bereits bekannt, verlaufen die Feldlinien in einem Kondensator parallel, es entsteht ein homogenes Feld (siehe Abb. 11.4).

Werden die Leitungen zu den Platten unterbrochen, zeigt ein Elektroskop an, daß die Ladung im Kondensator erhalten geblieben ist. Der Kondensator kann daher als *Ladungsspeicher* betrachtet werden.

Zwischen den Platten besteht eine Potentialdifferenz, also eine Spannung. Verdoppelt man die Ladung Q des Kondensators, so verdoppelt sich die Span-

nung U. Daraus folgt: Ladung und Spannung sind zueinander proportional ($Q \sim U$).

Der Proportionalitätsfaktor C heißt *Kapazität* des Kondensators.

Kondensatorgleichung: $Q = C \cdot U$
Durch die Kapazität C ist jene Ladungsmenge Q bestimmt, die dem Kondensator die Spannung U verleiht. Q ist dabei die Ladung einer der beiden Platten.

Aus $C = Q / U$ folgt: $[C] = 1\ \text{As} / 1\ \text{V} = 1$ Farad (1 F)

Die Einheit Farad ist nach Michael Faraday benannt. 1 F ist eine sehr große Einheit, man verwendet daher Teile: µF, nF, pF.

Da man eine Platte des Kondensators durch die Erde ersetzen kann, gilt:

Jeder Leiter besitzt bezüglich der Erde eine bestimmte Kapazität.

Versuch

Ein Plattenkondensator wird geladen, die Spannung mit Hilfe eines Meßgerätes, *Voltmeter* genannt, gemessen.

Wird der Plattenabstand d bei gleichbleibender Ladung vergrößert (Abb. 17.3), steigt die Spannung: $U \sim d$.

Daraus und aus $C = Q / U$ folgt: $C \sim \frac{1}{d}$

Verdoppelt (verdreifacht, ...) man die Plattenfläche, bedarf es der doppelten (dreifachen, ...) Ladung, um die gleiche Spannung zu erzielen. Daraus und aus $C \sim Q$ folgt: $C \sim A$.

Aus $C \sim \frac{1}{d}$ und $C \sim A$ folgt: $C \sim \frac{A}{d}$

Wir wollen diese Erkenntnis, gewonnen aus dem Experiment, nun durch Überlegungen bestätigen:

Da die Feldlinien fast nur innerhalb der parallelen Platten verlaufen, tritt der gesamte elektrische Fluß aus der linken Platte aus und mündet an der rechten Platte. Es gilt die Grundgleichung der Elektrostatik:
(1) $Q = \varepsilon_0 \Phi_E = \varepsilon_0 E A$

Welche Arbeit wird verrichtet, wenn man eine Probeladung q gegen das Feld von der einen zur anderen Kondensatorplatte verschiebt?
(2) $W = q U$ (3) $W = F d$ (4) $F = E q$ (Da das Feld homogen ist, sind E und F konstante Größen.)

(2), (3), (4) $q U = E q d \Leftrightarrow \boxed{U = E d}$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 E A}{E d} = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$$

Kapazität des Plattenkondensators: $C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}$

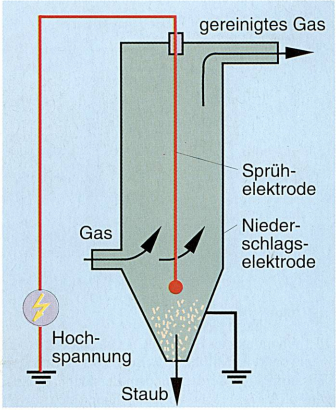
Beispiel A

Ein Kondensator besteht aus zwei kreisrunden Platten (Durchmesser 12 cm), die einen Abstand von 10 mm aufweisen. Der Kondensator wird geladen, bis eine Spannung von 300 V auftritt.

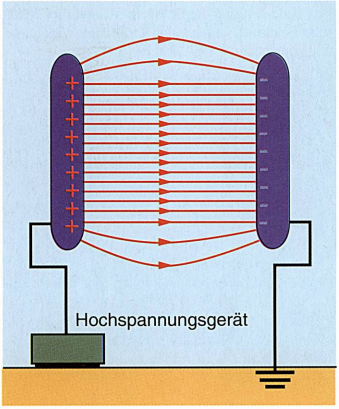
a) Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten?

$U = E d \quad \Leftrightarrow \quad E = \frac{U}{d}$

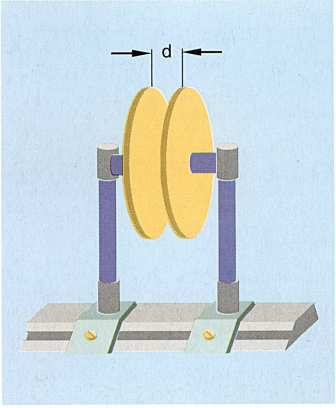
$$E = \frac{300\ \text{V}}{10^{-2}\ \text{m}} = 30\,000\ \text{V / m}$$



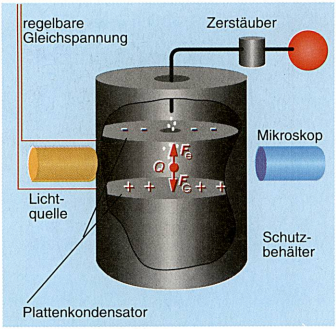
17.1 Schemadarstellung eines Elektrofilters



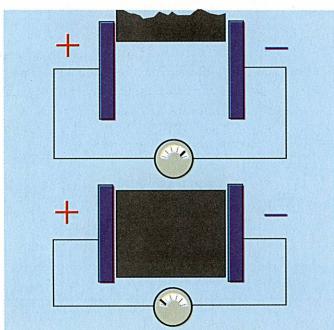
17.2 Ein Plattenkondensator wird geladen.



17.3 Ein Plattenkondensator, dessen Plattenabstand verändert werden kann



18.1 Abbildung zu Beispiel C - Öltröpfchenexperiment von R. A. Millikan: Zwischen die beiden Kondensatorplatten werden mit dem Zerstäuber winzige Öltröpfchen gebracht. Darunter finden sich sowohl positiv als auch negativ geladene Tröpfchen. Man beobachtet nun eines dieser geladenen Teilchen und stellt die Spannung so ein, daß es in Schwebe bleibt. Das bedeutet, daß die Schwerkraft und die elektrische Feldkraft, die auf das Tröpfchen wirken, betragsgleich sind.



18.2 Schiebt man zwischen die beiden Kondensatorplatten einen Isolator, sinkt die Spannung.

Glas	5 – 16
Gummi	2,5 – 3,5
Keramische Stoffe	1000 – 8000
Paraffin	2,0 – 2,3
Quarz	3,8 – 4,7
Benzol	2,3
Rizinusöl	4,6
Wasser (bei 0 °C)	88
Helium	1,00006
Wasserstoff	1,00025
Luft	1,000592
Vakuum	1

18.3 Relative Dielektrizitätszahlen

b) Berechne die Kapazität!

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d} = \frac{8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{A^2\,s^2\,N^{-1}\,m^{-2}} \cdot (0{,}12\ \mathrm{m})^2 \cdot \pi}{0{,}01\ \mathrm{m}} \approx$$

$$\approx 4{,}0 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{F} = 40\ \mathrm{pF}$$

Beispiel B

Berechne die Kapazität einer Kugel mit dem Radius r gegenüber einer weit entfernten leitenden Umgebung.

(1) $C = \frac{Q}{U}$ (2) $U = \frac{Q}{4\,\pi\,\varepsilon_0\,r}$

(1), (2) $C = \frac{Q \cdot 4\,\pi\,\varepsilon_0\,r}{Q} = 4\,\pi\,\varepsilon_0\,r$

Beispiel C

In einen Kondensator mit horizontalen Platten, deren Abstand 12 cm beträgt, wird ein geladenes Teilchen mit der Masse $2 \cdot 10^{-14}$ kg gebracht. Die Potentialdifferenz zwischen den Platten wird so geregelt, daß das Teilchen, welches 2 Elemtarladungen trägt, schwebt (Abb 18.1). Berechne diese Potentialdifferenz!

(1) $F_e = F_G$ (2) $F_e = E\,Q$ (3) $F_G = m\,g$

(1), (2), (3) $E = \frac{m\,g}{Q}$

$U = E\,d = \frac{m\,g\,d}{Q}$

$$U = \frac{2 \cdot 10^{-14}\ \mathrm{kg} \cdot 9{,}81\ \mathrm{m\,s^{-2}} \cdot 0{,}12\ \mathrm{m}}{2 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{As}} \approx 7{,}4 \cdot 10^4\ \mathrm{V} = 74\ \mathrm{kV}$$

Mit einer solchen Versuchsanordung bestimmte *R. A. Millikan* (1868 – 1953), die Größen Masse, Spannung, Abstand und berechnete die Ladung.

Aufgaben

9. Welche Ladung enthält ein Kondensator mit der Kapazität 2 nF, wenn eine Spannung von 220 V herrscht?

10. Ein Kondensator soll eine Kapazität von 1 F aufweisen. Berechne die Plattengröße, wenn der Abstand 10 cm beträgt.

11. Berechne die Kapazität der Erde gegenüber dem Fixsternhimmel.

12. Zwischen den Platten eines Kondensators (A = 15 dm^2) herrscht eine Potentialdifferenz von 100 V bei einem Plattenabstand von 0,5 mm. Wie groß ist die Kraft, mit der die beiden Platten einander anziehen?

1.12 Kondensator und Dielektrikum

Versuch (Abb. 18.2)

Ein Plattenkondensator weist eine Spannung von 500 V auf. Nun schiebt man zwischen die Platten bei gleichbleibendem Abstand eine Hartgummischeibe, ein sogenanntes *Dielektrikum*. Die Folge ist ein Sinken der Spannung auf 200 V. Entfernt man das Dielektrikum, steigt die Spannung wieder auf ihren ursprünglichen Wert.

Da während des Versuches die Ladung konstant gehalten wird, hat sich nach $C = Q / U$ die Kapazität verändert.

In unserem Versuch wurde durch das Dielektrikum die Kapazität um das 2,5fache vergrößert.

Wir müssen daher einen Faktor ε_r in der Kapazitätsformel ergänzen.

ε_r wird *relative Dielektrizitätszahl* genannt.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \, \varepsilon_r \, A}{d}$$

Mit Hilfe eines Dielektrikums kann die Kapazität eines Kondensators vergrößert werden. Die relative Dielektrizitätszahl ε_r ist eine Verhältnisgröße. Sie gibt an, um wieviel sich die Kapazität mit dem Dielektrikum gegenüber jener im Vakuum erhöht hat.

Erklärung:

Vom atomaren Standpunkt betrachtet fallen in einem Dielektrikum im feldfreien Zustand die Ladungsschwerpunkte der positiven Kernladung und der negativen Ladung der Elektronenhülle zusammen.

Greift ein äußeres elektrisches Feld an, werden die Ladungsschwerpunkte verschoben. Es bilden sich *molekulare Dipole* aus (Abb. 19.1). Man sagt, das Dielektrikum wird *polarisiert*. Die Erscheinung selbst wird als *Verschiebungspolarisation* bezeichnet. Zur positiven Platte des Kondensators hin tritt ein Überschuß an Elektronen auf. Ein Teil der Feldlinien endet somit am Dielektrikum. Am gegenüberliegenden Ende entsteht ein Elektronenmangel. Feldlinien gehen von dieser Seite aus und enden an der negativ geladenen Kondensatorplatte (Abb. 19.2).

Das elektrische Feld wird durch die Polarisationsladungen geschwächt. Die Feldstärke und damit die Spannung ($U = E\,d$) werden kleiner, die Kapazität steigt.

Wird die Spannung zwischen den Kondensatorplatten konstant gehalten, so steigt nach Einführung des Dielektrikums die Ladung auf den ε_r-fachen Wert.

Die Moleküle vieler Stoffe haben aufgrund ihres Aufbaus bereits Dipolcharakter (z. B. Wasser). Wegen der thermischen Bewegung gibt es keine ausgezeichnete Dipolrichtung. Ein elektrisches Feld zwingt die Dipole in eine Vorzugsrichtung, und zwar umso mehr, je tiefer die Temperatur und je größer die Feldstärke ist. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Orientierungspolarisation.*

Versuch zur Orientierungspolarisation

Bringt man in die Nähe eines Wasserstrahls eine geladene Kugel, wird der Strahl abgelenkt (Abb. 19.3).

Versuch

Bringt man in einen Kondensator eine sehr dünne Metallscheibe, so sinkt die Spannung kaum merklich. Damit steigt auch die Kapazität kaum. Erklärung: Aufgrund der Elektronenbeweglichkeit werden so viele Ladungen an der Oberfläche der Metallplatte influenziert, wie eine Kondensatorplatte trägt. Das Innere des Metalls ist feldfrei. Es münden an der Metallplatte so viele Feldlinien, wie an der linken Kondensatorplatte entspringen. Genau so viele Feldlinien teten auch an der anderen Seite der Metallscheibe wieder aus und münden an der rechten Kondensatorplatte (Abb.19.4).

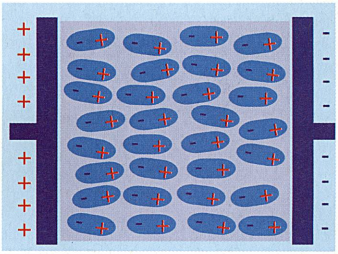
Beispiel A

Ein Kondensator, dessen rechteckige Platten 20 cm lang und 15 cm breit sind, besitzt als Dielektrikum eine Quarzglasplatte ($\varepsilon_r = 3{,}8$) mit der Dicke 2 mm. Wie groß ist die Kapazität des Kondensators?

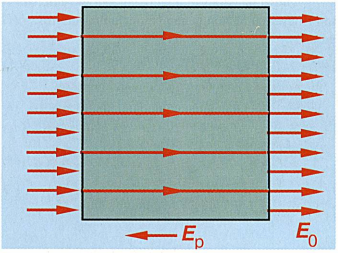
$$C = \varepsilon_0 \, \varepsilon_r \, \frac{A}{d}$$

$$C = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{A^2\,s^2\,N^{-1}\,m^{-2}} \cdot 3{,}8 \cdot \frac{0{,}2\,\mathrm{m} \cdot 0{,}15\,\mathrm{m}}{0{,}002\,\mathrm{m}} = 5{,}05 \cdot 10^{-10}\,\mathrm{F}$$

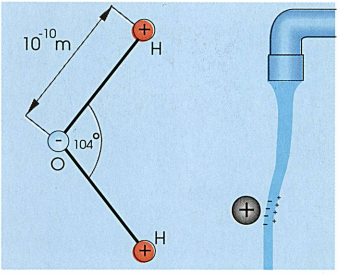
$$C = 0{,}505\,\mathrm{nF}$$



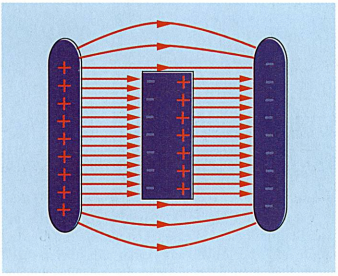
19.1 Das Dielektrikum wird polarisiert.



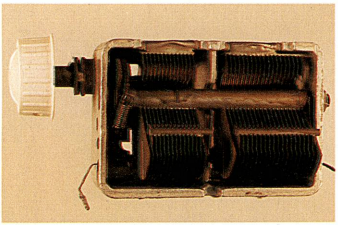
19.2 Der elektrische Fluß im Dielektrikum ist um das ε_r-fache kleiner als im Vakuum. Entsprechend kleiner sind auch die Feldstärke E und die Spannung U. $\boldsymbol{E}_0$ ist die Feldstärke ohne Dielektrikum. $\boldsymbol{E}_p$ ist die Feldstärke der Polarisationsladungen, welche in entgegengesetzter Richtung wirkt. Daher tritt eine Schwächung des ursprünglichen Feldes ein.



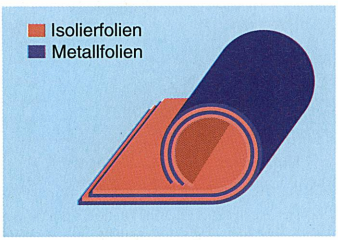
19.3 Ein Wassermolekül ist ein Dipolmolekül (links), Coulombsche Kräfte zwischen der geladenen Kugel und den Dipolmolekülen bewirken eine Ablenkung des Wasserstrahls (rechts).



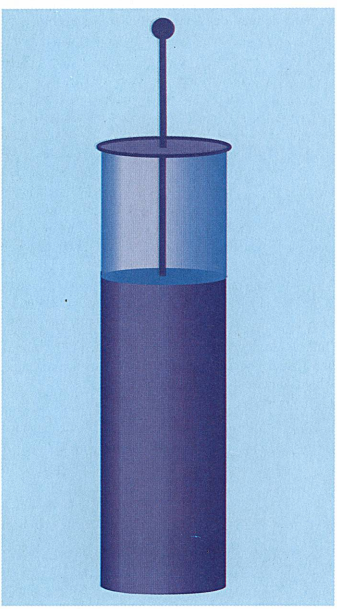
19.4 Eine Metallscheibe zwischen den Kondensatorplatten.



20.1 Drehkondensator. Seine Vorzüge liegen auf der Hand: Durch Verdrehen eines der beiden Plattensysteme kann die Kapazität des Kondensators kontinuierlich verändert werden. Drehkondensatoren finden vor allem in der Nachrichtentechnik Verwendung.



20.2 Wickelkondensator oder Blockkondensator. Er kann als Plattenkondensator mit geringem Platzbedarf aufgefaßt werden.



20.3 Leidener Flasche. Die beiden "Platten" sind zwei Stanniolbeläge. Der eine ist auf die Innen-, der andere auf die Außenseite einer Glasflasche geklebt. Die Kapazität einer Leidener Flasche ist klein, doch erreichen diese Kondensatoren hohe Spannungen

Beispiel B

Die 4 cm breiten Aluminiumbänder eines Wickelkondensators werden durch Paraffinpapier ($\varepsilon_r = 2{,}3$) isoliert ($d = 1{,}2$ mm). Wie lang müssen die Bänder sein, damit die Kapazität 0,9 nF beträgt?

(1) $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \dfrac{A}{d}$ (2) $A = l\,b$

(1), (2) $l = \dfrac{C\,d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}$

$$l = \frac{0{,}9 \cdot 10^{-9}\ \mathrm{F} \cdot 0{,}0012\ \mathrm{m}}{8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{A^2\,s^2\,N^{-1}\,m^{-2}} \cdot 2{,}3 \cdot 0{,}04\ \mathrm{m}} = 1{,}33\ \mathrm{m}$$

Elektrostriktion

Wird ein Dielektrikum polarisiert, ändert sich sein Volumen. Die in Feldrichtung liegenden Dipole üben aufeinander Anziehungskräfte aus, denn auf den positiven Pol eines Moleküls folgt der negative des benachbarten. Aufgrund dieser Kräfte nähern sich die Moleküle, bis ein Gleichgewicht zwischen elastischen und elektrischen Kräften erreicht ist. (Anwendung siehe Seite 23!)

Aufgaben

13. Ein Kondensator wird geladen und dann vom Spannungsgerät getrennt. Wie ändern sich Kapazität, Ladung, Spannung und Feldstärke, wenn der Kondensator mit einem Dielektrikum ($\varepsilon_r = 2$) gefüllt wird?

14. Ein Kondensator mit quadratischen Platten ($a = 10$ cm, $d = 3$ mm) wird mit Gummi ($\varepsilon_r = 3$) gefüllt. Berechne die Kapazität des Kondensators!

1.13 Bauformen von Kondensatoren

Kondensatoren befinden sich in fast jedem elektrischen Gerät. Die Funktionsweise eines Kondensators wird in der Gleich- und Wechselstromtechnik noch ausführlich besprochen.
Je nach Anwendung gibt es verschiedene Ausführungen von Kondensatoren. Weiters ist zu beachten, daß für Kondensatoren die Durchschlagsfestigkeit bekannt sein muß. Wird nämlich die Spannung zu hoch, kann es zu einem plötzlichen Ladungsausgleich kommen, wodurch der Kondensator zerstört werden kann.

Drehkondensator (Abb. 20.1)

Dieser besteht aus mehreren Plattensätzen, wobei sich ein Plattensystem gegenüber dem anderen verdrehen läßt. Je weiter das drehbare Plattensystem in das andere hineingedreht ist, umso größer ist die Kapazität des Drehkondensators. Es ist nur jene Plattenfläche wirksam, die von den fixen Platten überdeckt ist.

Keramikkondensator

Dieser ist aus einer Keramikschicht (Dielektrikum) aufgebaut, auf welcher Metallbeläge aufgedampft sind. Keramikkondensatoren besitzen eine hohe Durchschlagsfestigkeit.

Wickelkondensator (Abb. 20.2)

Er besteht aus zwei aufgewickelten Metallfolien, getrennt durch Kunststoff- oder Papierfolien als Dielektrikum.

Elektrolytkondensator

Eine der Kondensatorplatten besteht aus einer Papierschicht, die mit einem Elektrolyten getränkt worden ist. Das Dielektrikum ist eine extrem dünne Oxidschicht auf einem Metallstreifen, der zweiten Kondensatorplatte. Auf diese Oxidschicht sind die hohen Kapazitäten von Elektrolytkondensatoren zurückzuführen. Bei falscher Polung werden diese allerdings zerstört.

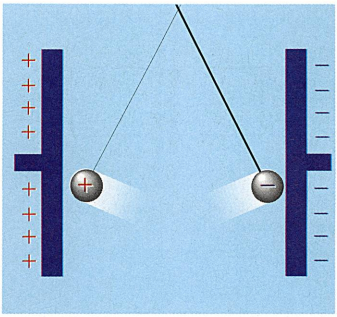
Leidener Flasche (Abb. 20.3)

Sie wird für hohe Spannungen verwendet. Dieser Kondensator besteht aus einem oben offenen Glaszylinder, welcher innen und außen mit einer metallischen Schicht versehen ist.

1.14 Elektrische Energie des Kondensators

Versuch

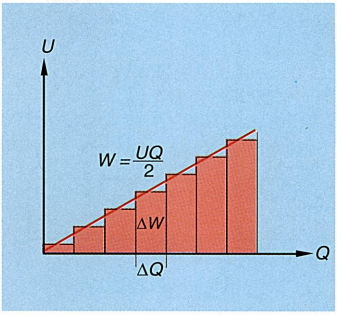
Entladen eines Kondensators: Gibt man ein an einem Faden hängendes Stanniolkügelchen zwischen die Platten eines Kondensators und bringt es mit einer der Platten in Kontakt, so erhält es dadurch eine gleichnamige Ladung, wird abgestoßen und gelangt zur anderen Seite (Abb. 21.1). Dort wird die Ladung des Kügelchens zuerst neutralisiert, dann wird dieses umgeladen. Beim Aufprallen auf die Platten wird das Pendel abgebremst. Dabei wird mechanische Energie in innere Energie umgewandelt. Die mechanische Energie kann nur aus dem elektrischen Feld stammen.
Die Potentialdifferenz zwischen den Platten nimmt bei jeder Schwingung ab. Dieser Vorgang geht so lange vor sich, bis der Kondensator entladen ist.
Man erkennt: Der geladene Kondensator hat Energie gespeichert, die in Arbeit umgesetzt werden kann.
Beim Laden eines Kondensators wird die Ladung und damit auch die Spannung von einem Anfangswert Null bis zu einem Endwert Q bzw. U aufgebaut.



21.1 Das Stanniolkügelchen pendelt so lange hin und her, bis der Kondensator entladen ist.

Elektrische Energie des Kondensators

$$E_{el} = \frac{Q\,U}{2} \quad \text{oder} \quad E_{el} = \frac{C\,U^2}{2}$$



21.2 Welche elektrische Arbeit wird verrichtet, wenn der Kondensator geladen wird? Dazu ein Gedankenexperiment: Der Kondensator besitze eine Ladung Q, und zwischen den PLatten herrsche eine Potentialdifferenz U. Die Vergrößerung der Ladung kann nur dadurch erreicht werden, daß man eine kleine negative Ladung ΔQ in Feldrichtung zur gegenüberliegenden Platte befördert. Dabei wird die Arbeit $\Delta W = \Delta Q \cdot U$ verrichtet (Rechtecksfläche). Als Folge davon steigt die Spannung. Das Laden eines Kondensators kann auf diese Weise in viele Teilschritte zerlegt werden. Die Dreiecksfläche wird durch kleine Rechtecksflächen angenähert. Für $\Delta Q \to 0$ erhält man die farbig unterlegte Fläche. Diese entspricht der verrichteten Arbeit und somit auch der gespeicherten elektrischen Energie.

Beispiel A

Ein geladener Kondensator hat bei einer Ladung von 8,7 nAs eine Spannung von 100 V.

a) Berechne seine Kapazität!

$$C = \frac{Q}{U}$$

$$C = \frac{8{,}7 \cdot 10^{-9}\ \text{As}}{100\ \text{V}} = 8{,}7 \cdot 10^{-11}\ \text{F} = 87\ \text{pF}$$

b) Berechne die gespeicherte elektrische Energie.

$$W = \frac{Q\,U}{2}$$

$$W = \frac{8{,}7 \cdot 10^{-9}\ \text{As} \cdot 100\ \text{V}}{2} = 4{,}35 \cdot 10^{-7}\ \text{J} = 435\ \text{nJ}$$

Aufgaben

15. Ein Kondensator besitzt eine Ladung von $5 \cdot 10^{-9}$ As bei einer Potentialdifferenz von 110 V. Berechne seine Kapazität und die gespeicherte Energie.

16. Ein Elektronenblitzgerät besitzt einen Kondensator, der zum Betrieb der Blitzlampe eine Energie von 14 J speichern muß. Ermittle seine Kapazität, wenn die Spannung 1000 V beträgt.

17. Ein Kondensator (C = 30 µF) wird an eine Spannung von 2000 V angeschlossen. Wie groß ist die gespeicherte elektrische Energie?

Energiedichte des elektrischen Feldes

Unter Energiedichte versteht man den Quotienten aus elektrischer Energie und dem vom Feld "beanspruchten" Volumen.

(1) $E_{el} = \frac{Q\,U}{2}$ (2) $U = \frac{Q}{C}$

(3) $Q = \varepsilon_o A\,d\,E$ (4) $C = \varepsilon_o \frac{A}{d}$

(1), (2), (3),(4) $E_{el} = \frac{Q^2}{2\,C} = \frac{\varepsilon_o E^2 A\,d}{2}$

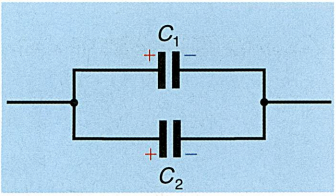
$$\frac{E_{el}}{V} = \frac{\varepsilon_o E^2}{2}$$

1.15 Schaltungen von Kondensatoren

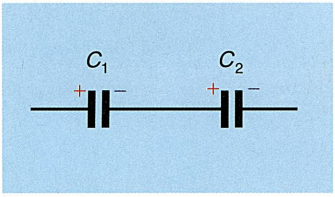
Parallelschaltung

Versuch

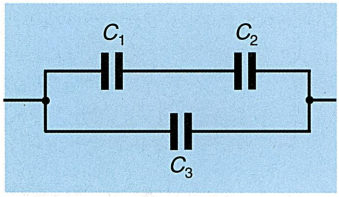
Zwei Kondensatoren mit den Kapazitäten C_1 und C_2 werden parallel geschaltet und geladen (Abb. 22.1). Es sind also die positiv geladenen bzw. die negativ



22.1 Die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 sind parallel geschaltet.



22.2 Die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 sind in Serie geschaltet.



22.3 Abbildung zu Beispiel A

Beispiel B

Zwei Kondensatoren mit den Kapazitäten 3 µF und 5 µF werden parallel geschaltet. Sie werden nun mit insgesamt 800 µAs geladen.

a) Berechne die Gesamtkapazität und die gesamte Spannung der Schaltung.

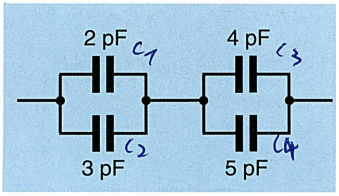
$$C_g = C_1 + C_2 = 3 \cdot 10^{-6}\,\text{F} + 5 \cdot 10^{-6}\,\text{F} = 8 \cdot 10^{-6}\,\text{F} = 8\,\mu\text{F}$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{800 \cdot 10^{-6}\,\text{As}}{8 \cdot 10^{-6}\,\text{F}} = 100\,\text{V}$$

b) Wie groß sind die Einzelladungen?

$$Q_1 = U\,C_1 = 100\,\text{V} \cdot 3 \cdot 10^{-6}\,\text{V} = 300\,\mu\text{As}$$

$$Q_2 = Q_g - Q_1 = 500\,\mu\text{As}$$



22.4 Abbildung zu Aufgabe 18

geladenen Platten miteinander verbunden. Die insgesamt vorhandene Ladung verteilt sich den Kapazitäten entsprechend auf beide Kondensatoren.
Es gilt:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Da die gleichnamig geladenen Platten miteinander verbunden sind, herrscht an beiden Kondensatoren die gleiche Potentialdifferenz.

$$C_1 = \frac{Q_1}{U}, \quad C_2 = \frac{Q_2}{U}$$

Die Gesamtkapazität C dieser Schaltung errechnet sich nun als:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2$$

In einer Parallelschaltung von Kondensatoren ergibt sich die Gesamtkapazität als Summe der Einzelkapazitäten: $C = \sum_i C_i$

Serienschaltung

Nun werden die beiden Kondensatoren in Serie geschaltet (Abb. 22.2). Die miteinander verbundenen Platten sind entgegengesetzt geladen.

Die Ladungen der rechten Seite des Kondensators mit der Kapazität C_1 und der linken Seite des Kondensators mit der Kapazität C_2 sind aufgrund der Influenzwirkung betragsgleich.

Es haben also beide Kondensatoren die gleiche Ladung. Daraus folgt für die Potentialdifferenzen U_1 und U_2:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}$$

Die gesamte Spannung ist die Summe der Teilspannungen:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Daraus folgt:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

In einer Serienschaltung von Kondensatoren ergibt die Summe der Kehrwerte der Einzelkapazitäten den Kehrwert der Gesamtkapazität: $\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i}$

➤ Beispiel A

Berechne die Gesamtkapazität der Kondensatoren $C_1 = 2\,\mu\text{F}$, $C_2 = 3\,\mu\text{F}$ und $C_3 = 4\,\mu\text{F}$ in der angegebenen Schaltung (Abb. 22.3).

Zwei Kondensatoren sind in Serie und der dritte zu diesen parallel geschaltet. Man berechnet daher zuerst die Kapazität C_s der Serienschaltung und dann die gesamte Kapazität C_g.

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow C_s = \frac{C_1\,C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_s = \frac{2 \cdot 10^{-6}\,\text{F} \cdot 3 \cdot 10^{-6}\,\text{F}}{2 \cdot 10^{-6}\,\text{F} + 3 \cdot 10^{-6}\,\text{F}}$$

$$C_s = 1{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{F}$$

$$C_g = C_s + C_3$$

$$C_g = 1{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{F} + 4 \cdot 10^{-6}\,\text{F}$$

$$C_g = 5{,}2 \cdot 10^{-6}\,\text{F}$$

Aufgaben

18. Berechne die Gesamtkapazität der Schaltung in Abb. 22.4.

19. Welche Kapazitäten erreichen zwei Kondensatoren mit gleicher Kapazität ($C = 2$ pF), wenn sie einmal parallel und einmal in Serie geschaltet werden?

20. Drei parallel geschaltete Kondensatoren mit einer Kapazität von je 80 pF werden einzeln geladen, wodurch eine Potentialdifferenz von 220 V entsteht. Dann werden die Kondensatoren in Serie geschaltet. a) Wie groß ist die Gesamtkapazität? b) Wie groß ist die gesamte gespeicherte Energie?

1.16 Piezoelektrizität

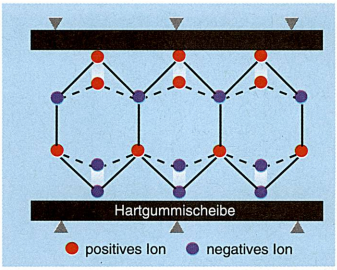
Versuch (Abb. 23.1)

Ein Quarzkristall wird an beiden Enden mit einem Metalldraht versehen und mit einem Spannungsmeßgerät verbunden. Wird nun auf den Quarz ein Druck ausgeübt, zeigt das Meßgerät eine Spannung an.

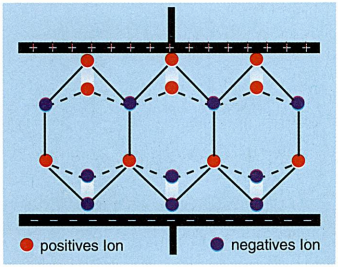
Erklärung: Das Kristallgitter eines Quarzkristalls besteht aus Sechsecken, deren Eckpunkte abwechselnd von positiven und negativen Ionen gebildet sind. Im unbeanspruchten Zustand halten sich die Ladungen das Gleichgewicht, die elektrischen Kräfte heben sich auf. Bei mechanischer Belastung wird das Kristallgitter verzerrt. So wird etwa an der oberen Grenzfläche die positive Ladung, an der unteren die negative nach innen gedrückt. Dabei verändert sich der Abstand zu den ungleichnamig geladenen Nachbarn. Die Oberseite wird dadurch negativ und die Unterseite positiv geladen. Der Kristall erfährt durch die Deformation eine elektrische Polarisation.

Diese Erscheinung heißt *piezoelektrischer Effekt*. Er wurde von den französischen Physikern *Jacques* und *Pierre Curie* 1880 entdeckt. Man nützt ihn zur genauen Messung von Drucken und zum Bau von Mikrophonen.

Wird ein Quarzkristall zwischen geladene Kondensatorplatten gebracht, tritt durch das elektrische Feld eine elastische Deformation des Kristalls auf (vgl. auch Seite 20: *Elektrostriktion*). Man bezeichnet dies als *umgekehrten piezoelektrischen Effekt* (Abb. 23.2). Legt man an den Kondensator ein elektrisches Feld, welches seine Richtung ständig ändert, wird der Kristall zu Eigenschwingungen mit konstanter Frequenz angeregt. Anwendungen: Quarzuhren, Lautsprecher, Erzeugung von Ultraschallschwingungen.



23.1 Wird auf den Quarz ein Druck ausgeübt, zeigt das Meßgerät eine Spannung an: piezoelektrischer Effekt

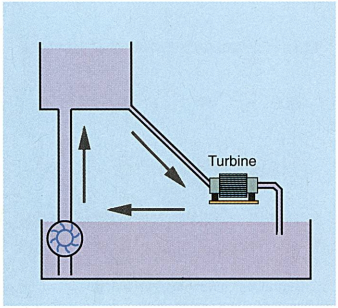


23.2 Befindet sich der Quarzkristall im elektrischen Feld eines Plattenkondensators, wird er deformiert: umgekehrter piezoelektrischer Effekt

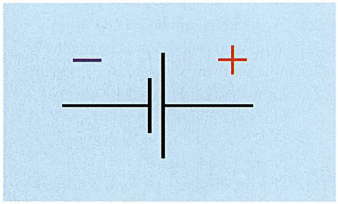
Kontrollfragen

1. Was versteht man unter positiver, was unter negativer Ladung?
2. Wie können Ladungen getrennt werden?
3. Was ist die Elemtentarladung?
4. Wie lautet der Ladungserhaltungssatz?
5. Erläutere das Coulombsche Gesetz!
6. Wie lautet das Superpositionsprinzip?
7. Erkläre die Meßgeräte für die Ladungsmessung.
8. Was versteht man unter einem elektrischen Feld?
9. Welche Richtung nehmen die Feldlinien bei positiven, welche bei negativen Ladungen ein?
10. Wie ist die elektrische Feldstärke definiert?
11. Erläutere den Begriff "elektrischer Fluß"!
12. Was versteht man unter einem homogenen Feld?
13. Erkläre den Begriff "Influenz"!
14. Wie ist das elektrische Potential festgelegt?
15. Was sind Äquipotentialflächen?
16. Was versteht man unter Spannung?
17. Erläutere die Bewegung einer Ladung bei einer Potentialdifferenz.
18. Warum ist bei elektrostatischen Verhältnissen das Innere eines Leiters feldfrei?
19. Wie funktioniert ein Bandgenerator?
20. Was ist ein Faradayscher Käfig?
21. Wie funktioniert ein Blitzableiter?
22. Wie wird ein Kondensator geladen?
23. Leite die Formel für die Kapazität eines Plattenkondensators her.
24. Was bewirkt ein Dielektrikum in einem Kondensator?
25. Was ist die Ursache für die Kapazitätserhöhung durch ein Dielektrikum in einem Kondensator?
26. Was versteht man unter Elektrostriktion?
27. Beschreibe einige Bauformen von Kondensatoren.
28. Wovon hängt die Größe der gespeicherten Energie im Kondensator ab?
29. Welche Schaltungen von Kondensatoren gibt es?
30. Was versteht man unter Piezoelektrizität?

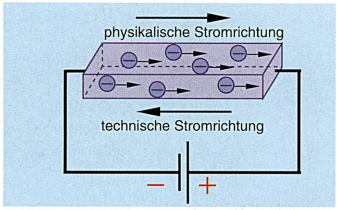
24.1 *André Marie Ampère* (1775 – 1836), französischer Physiker. Seine Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen haben die Physik des 19. Jh. entscheidend beeinflußt.



24.2 Ein Wasserstromkreis als Modell für einen elektrischen Stromkreis: Die Pumpe entspricht der Spannungsquelle. Sie verrichtet Arbeit, indem sie Wasser auf ein höheres Potential befördert.



24.3 Symbol für eine Spannungsquelle



24.4 Von links nach rechts: physikalische Stromrichtung, von rechts nach links: technische Stromrichtung

2. Grundgesetze des elektrischen Stromes. Gleichstrom

2.1 Elektrischer Strom

In der Elektrostatik haben wir uns mit den Erscheinungen der ruhenden elektrischen Ladungen beschäftigt. Um aber statische Zustände zu erreichen, z. B. einen geladenen Kondensator, müssen Elektronen bewegt werden, d. h. es fließt ein *elektrischer Strom*.

Die zugehörige physikalische Größe ist die *elektrische Stromstärke I*. Sie ist die physikalische Grundgröße der Elektrizitätslehre. Die Stromstärke gibt an, wie groß die Ladung ist, die in einer bestimmten Zeit durch den Querschnitt eines Leiters fließt.

Stromstärke I

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Ladung}}{\text{Zeit}} \qquad I = \frac{Q}{t}$$

$$[I] = \frac{1\ \text{C}}{1\ \text{s}} = 1\ \text{Ampere (1 A)}$$

Die Ladung Q ist somit eine abgeleitete Größe: $Q = I\,t$, $[Q] = 1\ \text{A} \cdot 1\ \text{s} = 1\ \text{As}$.

Die Voraussetzung für einen Ladungstransport ist eine Potentialdifferenz (Spannung) zwischen zwei Punkten eines Leiters. Es kommt schließlich zu einem Potentialausgleich, die Spannung wird Null.

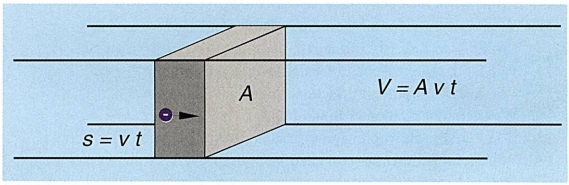
Eine *Spannungs-* oder *Stromquelle* (Generator, Batterie, Solarzelle, ...) wandelt nicht-elektrische in elektrische Energie um. Sie hält eine dauernde Spannung aufrecht. Die Spannungsquelle verhindert, daß es durch den Ladungstransport zu einem Potentialausgleich kommt. Dabei verrichtet sie fortlaufend Arbeit, indem positive Ladung von einem "tieferen" zu einem "höheren" Potential transportiert wird (Abb. 24.2).

Jene Stelle einer Spannungsquelle, bei der Elektronenüberschuß auftritt, wird als *Minuspol*, die Stelle des Elektronenmangels als *Pluspol* bezeichnet. Die Spannung, die an den Anschlüssen einer Spannungsquelle gemessen werden kann, wird als *Klemmenspannung* bezeichnet. Die Potentialdifferenz im Inneren der Quelle heißt *Quellenspannung*.

Verbindet man die beiden Pole über einen Kupferdraht miteinander, dann wandern die Elektronen zum Pluspol. Der Kupferdraht enthält freie Elektronen, sogenannte *Leitungselektronen*, die durch die Potentialdifferenz in Bewegung gesetzt werden. Da sich das elektrische Feld mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, wird der Elektronenstrom (fast) ohne Verzögerung einsetzen.

Man bezeichnet die Elektronenbewegung vom Minuspol zum Pluspol als *physikalische Stromrichtung*. Da man aber bei der Festlegung der Stromrichtung von bewegten positiven Ladungen ausgegangen war, wurde die Bewegung der Ladungsträger vom Pluspol zum Minuspol festgelegt. Dies ist die *technische Stromrichtung* (Abb. 24.4).

Bewegen sich die Elektronen aufgrund eines Feldes von links nach rechts, so ist die Ladung, die durch die Querschnittsfläche A mit der (durchschnittlichen) Geschwindigkeit v in der Zeit t tritt, abhängig von der Elektronendichte n (Anzahl der Elektronen pro m^3) und der Elektronenladung:



24.5 Die Elektronengeschwindigkeit v

$$Q = A\,v\,t\,n\,e \qquad I = A\,v\,n\,e \qquad v = \frac{I}{A\,n\,e}$$

Beispiel A: *Elektronengeschwindigkeit*

Berechne die Geschwindigkeit der Elektronen in einem Kupferdraht von 1 mm^2 Querschnitt, wenn die Stromstärke 1 A beträgt. Die Dichte von Kupfer beträgt 8900 kg/m^3 und die molare Masse 63,6 g/mol. Allgemein gilt: 1 mol eines Stoffes enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Vorerst muß die Elektronendichte berechnet werden. Dabei kann angenommen werden, daß jedes Kupferatom ein Leitungselektron zur Verfügung stellt.

Damit gilt:

$$n = \frac{8900\ \mathrm{kgm^{-3}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \mathrm{mol^{-1}}}{63{,}6 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kgmol^{-1}}}$$

$$n = 8{,}43 \cdot 10^{28}\ \mathrm{m^{-3}}$$

1 m^3 enthält $8{,}43 \cdot 10^{28}$ Leitungselektronen.

$$v = \frac{1\ \mathrm{A}}{1 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2} \cdot 8{,}43 \cdot 10^{28}\ \mathrm{m^{-3}} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{As}} = 7{,}4 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m/s}$$

Die Geschwindigkeit der Elektronen beträgt ungefähr 0,1 mm/s.

Die Elektronen treffen bei ihrem Weg durch den Draht ständig auf die Gitterbausteine des Metalls. Diese werden durch die Zusammenstöße mit den Elektronen in Schwingungen versetzt. Die Elektronen geben also einen Teil ihrer Energie ab, das Metall erwärmt sich. Es wird elektrische Energie in innere Energie umgewandelt, welche auch Stromwärme genannt wird.

Durch den Leiter wird also der Stromfluß begrenzt, man bezeichnet diese Eigenschaft als *elektrischen Widerstand.*

2.2 Das Ohmsche Gesetz

Wir setzen bei der folgenden Versuchsanordnung als bekannt voraus, daß es *Stromstärkemeßgeräte (Amperemeter)* und *Spannungsmeßgeräte (Voltmeter)* gibt. Ihre Funktionsweise wird in einem späteren Kapitel besprochen.

Versuch (Abb. 25.1)

Eine Spannungsquelle mit veränderbarer Spannung wird mit einem Konstantandraht verbunden. (Weshalb man die Legierung Konstantan verwendet,wird auf Seite 27 erklärt.) Die beiden Elemente stellen einen *Stromkreis* dar.

Man führt nun eine Meßreihe durch, wobei Spannung und Stromstärke gemessen werden (Tab. 25.2). Die Werte werden in ein Diagramm eingetragen (Abb. 25.3). Der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung wird auch als *Kennlinie* bezeichnet. Ihr ist zu entnehmen, daß zwischen Spannung und Stromstärke ein linearer Zusammenhang besteht.

Die Spannung ist proportional zur Stromstärke: $U \sim I$

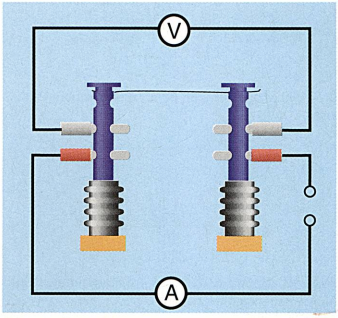
Bezeichnet man den Proportionalitätsfaktor mit R, so erhält man: $U = R\,I$.

Dieser Proportionalitätsfaktor für die Meßreihe von Tab. 25.3 hat die Maßzahl 1,3. Die physikalische Größe R heißt *elektrischer Widerstand*, der Zusammenhang $U = R\,I$ heißt *Ohmsches Gesetz.*

Ohmsches Gesetz

$U = R\,I$ $\qquad$ R heißt *elektrischer Widerstand.*

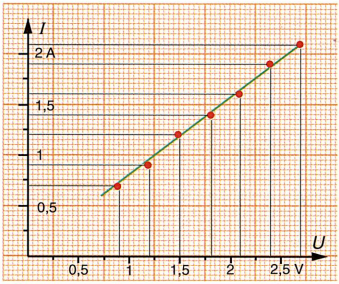
$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{1\ \mathrm{V}}{1\ \mathrm{A}} = 1\ \mathrm{Ohm}\ (1\ \Omega)$$



25.1 Experimentelle Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Stromstärke und Spannung

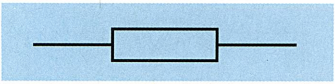
U (in V)	I (in A)
0,9	0,7
1,2	0,9
1,5	1,2
1,8	1,4
2,1	1,6
2,4	1,9
2,7	2,1

25.2 Eine mögliche Meßreihe

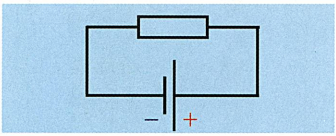


25.3 Diagramm zum Ohmschen Gesetz

25.4 *Georg Simon Ohm* (1787 – 1854), deutscher Physiker. Er entdeckte 1826 das nach ihm benannte Gesetz. Erst Jahre nach dessen Veröffentlichung wurde die Reichweite dieser Gesetzmäßigkeit erkannt.



26.1 Schaltzeichen für einen elektrischen Widerstand



26.2 Schaltplan: Stromkreis mit Spannungsquelle und Widerstand (Beispiel A)

Metalle:	
Konstantan	0,5
Eisen	0,086
Leitungsaluminium	0,0286
Gold	0,022
Leitungskupfer	0,0178
Silber	0,016
Nichtmetalle:	
Bürstenkohle	40 – 100
Wasser	$10^7 - 10^9$
destilliertes Wasser	$10^{10} - 4 \cdot 10^{10}$
Holz	$10^{15} - 10^{19}$
Glas	$10^{17} - 10^{19}$

26.3 Einige spezifische Widerstände bei 20 °C in 10^{-6} Ωm

Beispiel B

Eine 90 km lange elektrische Leitung aus Eisendraht hat einen Widerstand von 510 Ω.

a) Berechne den Querschnitt der Leitung.

$$R = \rho \frac{l}{A} \Leftrightarrow A = \rho \frac{l}{R}$$

$$A_{Fe} = \frac{0{,}086 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{m} \cdot 90 \cdot 10^3\ \text{m}}{510\ \Omega}$$

$$A_{Fe} = 1{,}52 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2$$

$$A_{Fe} = 15\ \text{mm}^2$$

b) Die Leitung soll bei gleichem Gesamtwiderstand durch Kupferdraht ersetzt werden. Berechne die Massenänderung gegenüber dem Eisendraht, wenn folgende Dichtewerte gelten: $\rho_{Cu} = 8900\ \text{kg/m}^3$ und $\rho_{Fe} = 7800\ \text{kg/m}^3$.

$$A_{Cu} = \frac{0{,}0178 \cdot 10^{-6}\ \Omega\text{m} \cdot 90 \cdot 10^3\ \text{m}}{510\ \Omega} =$$

$$= 3{,}14 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2$$

$$m_{Cu} = \rho_{Cu}\, V_{Cu}$$

$$m_{Cu} = 8900\ \text{kgm}^{-3} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2 \cdot$$

$$\cdot\, 90 \cdot 10^3\ \text{m} = 2516\ \text{kg}$$

$$m_{Fe} = \rho_{Fe}\, V_{Fe}$$

$$m_{Fe} = 7800\ \text{kgm}^{-3} \cdot 1{,}52 \cdot 10^{-5}\ \text{m}^2 \cdot$$

$$\cdot\, 90 \cdot 10^3\ \text{m} = 10\,654\ \text{kg}$$

$$\Delta m = 8138\ \text{kg}$$

Der Kehrwert des elektrischen Widerstandes wird als *Leitwert G* bezeichnet. In der rechnerischen Bearbeitung von Stromkreisen ist es manchmal zweckmäßiger, den Leitwert zu verwenden.

Leitwert G

$$G = \frac{1}{R} \qquad [G] = \frac{1}{1\ \Omega} = 1\ \text{Siemens (1 S)}$$

➤ **Beispiel A** (Abb. 26.2)

Eine Spannungsquelle hat eine konstante Spannung von 4,5 V. Wie groß ist ein Widerstand zu wählen, wenn im Stromkreis ein Strom von 0,2 A fließen soll?

$$R = \frac{U}{I} = \frac{4{,}5\ \text{V}}{0{,}2\ \text{A}} = 22{,}5\ \Omega$$

Widerstände dienen zur Begrenzung der Stromstärke in einem Stromkreis.Der Widerstandswert kann auch mit Hilfe eines Widerstandsmeßgerätes, eines *Ohmmeters*, gemessen werden. Dieses Meßgerät besitzt eine eigene Spannungsquelle.

2.3 Spezifischer Widerstand

Versuch

In einen Stromkreis wird bei konstanter Spannung zuerst ein 0,5 m langer Konstantandraht und anschließend einer mit 1 m Länge angeschlossen. Es zeigt sich, daß die gemessene Stromstärke halbiert wird. (Der Widerstand des ursprünglichen Stromkreises sei vernachlässigbar klein.) Das bedeutet: doppelte Drahtlänge – doppelter Widerstand. Allgemein:

(1) $R \sim l$

Nun verdoppelt man bei gleicher Länge den Querschnitt. Die Stromstärke steigt auf das Doppelte. Das bedeutet: doppelter Querschnitt – halber Widerstand. Allgemein:

(2) $R \sim \frac{1}{A}$

Aus (1) und (2) folgt: $R \sim \frac{l}{A}$

Welche Bedeutung besitzt in dieser Beziehung der Proportionalitätsfaktor? Führt man den Versuch mit Drähten gleicher Abmessungen, aber unterschiedlicher Materialien durch, erhält man verschiedene Stromstärken und damit differierende Widerstandswerte. Das bedeutet: Der Proportionalitätsfaktor ist eine materialabhängige Größe. Man bezeichnet sie als *spezifischen Widerstand* ρ.

Der elektrische Widerstand ist proportional zur Länge und verkehrt proportional zum Querschnitt des Leiters. Der Proportionalitätsfaktor ρ ist eine Materialkonstante.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [A]}{[l]} = \frac{1\ \Omega \cdot 1\text{m}^2}{1\ \text{m}} = 1\ \Omega\text{m}$$

Gebräuchlich ist auch die Einheit 1 $\Omega\text{mm}^2\ \text{m}^{-1}$ (= 10^{-6} Ωm)

2.4 Temperatur und Widerstand

Versuch

Ein Eisendraht von ungefähr 1 m Länge wird in einen Stromkreis mit einer Spannungsquelle und einem Amperemeter geschaltet (Abb. 27.1). Die Strom-

stärke wird am Amperemeter abgelesen. Dann erhitzt man den Draht; es kann festgestellt werden, daß bei fester Spannung die Stromstärke mit steigender Temperatur sinkt.

Der spezifische Widerstand der meisten Stoffe hängt von der Temperatur ab. In den meisten Fällen nimmt er mit steigender Temperatur zu. Die Angaben zum spezifischen Widerstand gelten streng nur für die Bezugstemperatur 20 °C. Es zeigt sich, daß die Widerstandsänderung ΔR proportional zum Widerstand R_{20} vor der Temperaturänderung und der Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ ist.

$\Delta R \sim R_{20} \cdot \Delta\vartheta$

R_{20} ist der Widerstand bei 20 °C.

Der Proportionalitätsfaktor wird als *Temperaturkoeffizient* α bezeichnet.

$\Delta R = \alpha R_{20} \Delta\vartheta$

Der Widerstand nach einer bestimmten Temperaturänderung ist :

$R = R_{20} + \Delta R$

$R = R_{20} (1 + \alpha \Delta\vartheta)$

Diese lineare Beziehung gilt nur innerhalb bestimmter Intervalle (vgl. Abb. 27.2). Für α wird meist ein Mittelwert angegeben, der für Temperaturen zwischen 0 °C und 30 °C gültig ist. Für die gebräuchlichsten Metalle liegt er bei etwa 1/250 $°C^{-1}$. Je reiner ein Metall ist, umso mehr nähert sich α dem Wert 1/273 $°C^{-1}$. Dies ist der Ausdehnungskoeffizient idealer Gase.

Versuch

Eine Kohlefadenlampe wird an eine Spannung von 220 V gelegt, die Stromstärke wird gemessen.Die Stromstärke steigt mit zunehmender Temperatur, der Widerstand sinkt (vgl. auch den Widerstandsverlauf von Kohle in Abb. 27.2). Daher erreicht die Lampe ihre volle Lichtstärke erst kurz nach dem Einschalten.

Materialien wie Kohle und Silizium besitzen einen negativen Temperaturkoeffizienten. Weiters gibt es Legierungen (z. B. Konstantan), deren Widerstand in einem bestimmten Temperaturintervall fast gleich bleibt. Sie sind von großer Bedeutung bei der Herstellung von Präzisionswiderständen. Widerstände mit einem positiven Temperaturkoeffizienten werden als PTK-Widerstände (*Kaltleiter*), jene mit einem negativen Temperaturkoeffizienten als NTK-Widerstände (*Heißleiter*) bezeichnet.

Bei Erwärmung schwingen die Atome eines Festkörpers stärker um ihren Platz im Kristallgitter. Die Bewegung der freien Elektronen in einem Kaltleiter wird durch die thermische Bewegung der Atome behindert. Der Widerstand steigt bei Temperaturzunahme. Bei Heißleitern ist der Abstand der Atome größer als bei Kaltleitern. Durch stärkere Schwingungen der Atome entstehen freie Ladungsträger, wodurch der Widerstand sinkt.

Widerstandsthermometer

Es besteht aus einem Platindraht, der sich in einer Quarzröhre befindet. Wird der Draht erwärmt, steigt der Widerstand, die Stromstärke sinkt. Diese Änderung kann auf einer Skala, welche auf Temperatureinheiten kalibriert ist, abgelesen werden.

Beispiel A

Ein Widerstandsthermometer besitzt bei 20 °C einen Widerstand von 7,53 Ω. Berechne den Widerstand bei 120 °C.

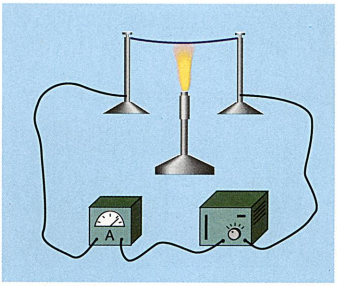
$R = R_{20} (1 + \alpha \Delta\vartheta)$

$R = 7{,}53\ \Omega\ (1 + 0{,}0039\ °C^{-1} \cdot 100\ °C) = 10{,}47\ \Omega$

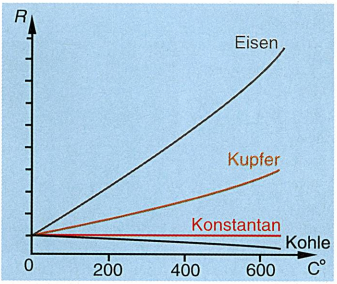
Aufgaben

21. Durch einen Leiter mit einem Widerstand von 10 Ω fließt in der Zeit von 8 min eine Ladung von 500 As. Wie groß ist die angelegte Spannung?

22. Welche Spannung muß an den Enden eines Konstantandrahtes (l = 20 m, A = 1,9 mm^2) herrschen, damit man eine Stromstärke von 50 A erhält?



27.1 Der spezifische Widerstand der meisten Stoffe ist temperaturabhängig.



27.2 Zusammenhang zwischen Temperatur und elektrischem Widerstand

Aluminium	0,0036
Platin	0,0039
Gold	0,0040
Kupfer	0,0040
Wolfram	0,0040
Kohle	–0,0002 bis –0,0008

27.3 Einige Temperaturkoeffizienten in $°C^{-1}$

Beispiel B

Ein Kupferdraht weist bei einer Betriebstemperatur von 30 °C einen Widerstand von 30 Ω auf. Die angelegte Spannung beträgt 220 V. Wie groß ist die Stromstärke unmittelbar nach dem Einschalten bei 20 °C, welche Stromstärke wird bei Betriebstemperatur erreicht?

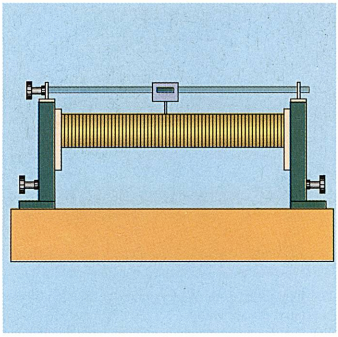
$R = R_{20} (1 + \alpha \Delta\vartheta) \Leftrightarrow$

$\Leftrightarrow R_{20} = \dfrac{R}{1 + \alpha \Delta\vartheta}$

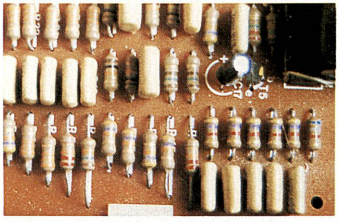
$R_{20} = \dfrac{30\ \Omega}{1 + 0{,}004\,°C^{-1} \cdot 10\,°C} = 28{,}85\ \Omega$

$I_{20} = \dfrac{220\ V}{28{,}85\ \Omega} = 7{,}63\ A$

$I_{30} = \dfrac{220\ V}{30\ \Omega} = 7{,}33\ A$



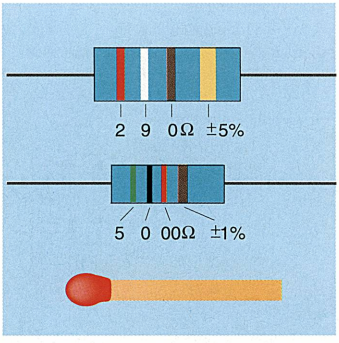
28.1 Schiebewiderstand



28.2 Schichtwiderstände können durch Farbringe gekennzeichnet sein.

	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
schwarz	0	0		
braun	1	1	0	± 1 %
rot	2	2	00	± 2 %
orange	3	3	000	
gelb	4	4	0000	
grün	5	5	00000	±0,5 %
blau	6	6	usw.	±0,25 %
violett	7	7		±0,1 %
grau	8	8		
weiß	9	9		
gold			:10	± 5 %
silber			:100	± 10 %

28.3 Farbcode auf Schichtwiderständen



28.4 Zwei Beispiele zum Farbcode von Schichtwiderständen

23. Berechne das Gewicht eines Kupferdrahtes, der einen Widerstand von 3,7 Ω und eine Länge von 500 m hat.

24. Welchen Wert muß ein Widerstand haben, damit in einem Stromkreis mit 220 V Spannung ein Gerät betrieben werden kann, welches eine Spannung von 50 V und eine Stromstärke von 2 A erfordert?

25. Bei welcher Temperatur ist der Widerstand eines Platindrahtes doppelt so groß wie bei 20 °C?

26. Welche Temperatur erreicht ein Widerstand aus Kupferdraht bei einer Spannung von 220 V, durch den bei 20 °C ein Strom von 2,5 A, im Dauerbetrieb jedoch 1,9 A fließt?

2.5 Bauformen von Widerständen

Schiebewiderstand (Abb. 28.1)

Der Schiebewiderstand besteht aus einem Keramikrohr, auf welches ein Widerstandsdraht gewickelt wird. Über einen Schleifer entlang einer Führung können unterschiedliche Widerstandswerte kontinuierlich eingestellt werden. Je länger die Strecke ist, die der Strom durch den Draht fließt, umso größer ist der Widerstand.

Schichtwiderstände

Drehwiderstand: Er besteht aus einem kreisförmigen Widerstandskörper, der meist mit einer Kohleschicht überzogen ist. Auf dieser Schicht werden über einen Schleifer die Widerstandswerte abgenommen.

In elektronischen Schaltungen werden *konstante Schichtwiderstände* verwendet. Auf einen Trägerkörper wird im allgemeinen eine Kohleschicht aufgebracht, für sehr konstante Widerstandswerte eine Metallschicht. Die Belastbarkeit eines Widerstandes hängt von seiner Fähigkeit ab, die entstehende innere Energie an die Umgebung abzugeben.

Farbkennzeichnung von Schichtwiderständen (Abb. 28.2):

Der Widerstandswert wird mit den ersten drei Ringen, die Toleranz mit dem vierten Ring angegeben. Die Toleranzangabe kann auch fehlen. Die ersten beiden Ringe geben die ersten zwei Ziffern des Ohmwertes, der dritte Ring gibt die Anzahl der Nullen an.

Weiters gibt es eine Fülle von verschiedenen Ausführungen von Widerständen, z. B. Halbleiterwiderstände, Fotowiderstände usw.

2.6 Elektrische Arbeit und Leistung

Um elektrische Ladungsträger von einem bestimmten Potential auf ein höheres Potential zu bringen, muß Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit ist als elektrische Energie gespeichert. Fließen die Ladungen zwischen den Polen eines elektrischen Stromkreises, verrichten sie *elektrische Arbeit.*
Dabei gilt:

$W = Q\,U$

Fließt ein *stationärer elektrischer Strom* (das bedeutet konstante Stromstärke), ist $Q = I\,t$. Man erhält: $W = U\,I\,t$. Ersetzt man U durch $R\,I$, erhält man:
$W = I^2\,R\,t$.

Elektrische Arbeit
$W = U\,I\,t = I^2\,R\,t$
$[W] = 1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} \cdot 1\ \text{s} = 1\ \text{J} = 1\ \text{Ws}$
Die elektrische Arbeit wird häufig in kWh angegeben:
1 kWh = 3,6 · 106 Ws

Elektrische Energie läßt sich durch Umwandlung anderer Energiearten gewinnen, z. B. aus der potentiellen Energie von Wassermassen mit Wasserturbinen; aus der inneren Energie mit Dampfturbinen; aus Strahlungsenergie mit Solarzellen usw. Elektrische Energie läßt sich wieder in andere Energieformen umwandeln.

Die *elektrische Leistung* ist der Quotient aus elektrischer Arbeit und der dazu benötigten Zeit:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U\,I\,t}{t} = U\,I \quad \text{oder} \quad P = \frac{I^2\,R\,t}{t} = I^2\,R$$

Elektrische Leistung
$P = U\,I = I^2\,R$ $\qquad [P] = 1\ \text{V} \cdot 1\ \text{A} = 1\ \text{W}$

➤ Beispiel A

Durch ein elektrisches Bügeleisen mit einer Leistung von 1,6 kW fließt ein Strom von 5 A.

a) Berechne den Widerstand.

$$P = I^2\,R \;\Leftrightarrow\; R = \frac{P}{I^2}$$

$$R = \frac{1600\ \text{W}}{(5\ \text{A})^2} = 64\ \Omega$$

b) Wie groß ist die elektrische Energie, die in 2 min in innere Energie umgewandelt wird, wenn keine Verluste auftreten sollen?

$W = P\,t$

$W = 1600\ \text{W} \cdot 120\ \text{s} = 192\ \text{kWs}$

Die gesamte elektrische Energie wird in innere Energie umgewandelt.

➤ Beispiel B

Ein Motor nimmt 3 kW elektrische Leistung auf und gibt 2,5 kW mechanische Leistung ab. Wie groß ist der Wirkungsgrad?

$$\eta = \frac{P_{mechanisch}}{P_{elektrisch}}$$

$$\eta = \frac{2{,}5\ \text{kW}}{3\ \text{kW}} = 0{,}83 = 83\ \%$$

Aufgaben

27. An einem Tauchsieder liegt eine Spannung von 220 V. Wie groß ist der Widerstand, wenn die Leistung 2200 W beträgt?

28. In einem Stiegenhaus gibt es 20 Glühlampen mit je 75 Watt Leistung, welche durchschnittlich 8 h pro Tag eingeschaltet sind. Ersetzt man sie durch Leuchtstofflampen, beträgt die Leistungsaufnahme nur noch 18 W pro Stück bei gleicher Lichtstärke. Wie groß ist die Energieersparnis in 30 Tagen?

29. Ein Elektrogerät mit der Leistung 300 W kann bei 220 V und 110 V (Umschalter) verwendet werden. Wie groß ist der Widerstand, der beim Wechsel von 110 V auf 220 V vorgeschaltet wird?

30. Mittels eines Tauchsieders soll 600 g Wasser in 4 min von 28 °C auf 80 °C erwärmt werden. (Um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen, benötigt man 4,190 J an Energie.) Berechne den Widerstand des Heizdrahtes, wenn er an einer Spannung von 220 V liegt.

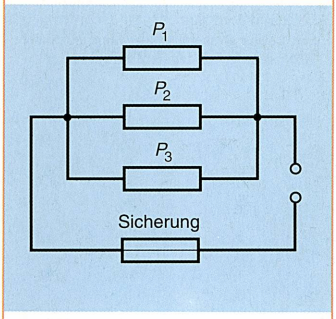
2.7 Innerer Widerstand

Eine ideale Spannungsquelle wäre ein Gerät, das immer eine konstante Spannung anbietet, gleichgültig, wie groß der entnommene Strom ist. Eine solche Quelle gibt es nicht. Jede praktisch verfügbare Stromquelle verändert ihre Klemmenspannung in Abhängigkeit vom entnommenen Strom.

29.1 Leistungsschild eines Bügeleisens

➤ Beispiel C

In einem Stromkreis werden bei einer Spannung von 220 V gleichzeitig 3 Geräte betrieben. Staubsauger: 800 W, Geschirrspüler: 1,2 kW, Bügeleisen: 1,6 kW. Der Stromkreis ist durch eine 20-A-Sicherung geschützt. Wird die Sicherung "halten"?



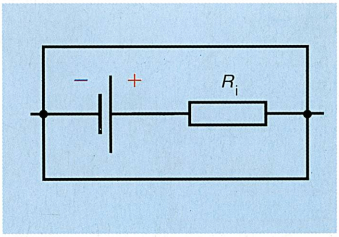
$P = P_1 + P_2 + P_3$

$P = 800\ \text{W} + 1200\ \text{W} + 1600\ \text{W} =$
$= 3600\ \text{W}$

$$P = U\,I \;\Leftrightarrow\; I = \frac{P}{U}$$

$$I = \frac{3600\ \text{W}}{220\ \text{V}} = 16{,}4\ \text{A}$$

Der Stromkreis ist nicht überlastet.



29.2 Spannungsquelle mit innerem Widerstand R_i

Beispiel A

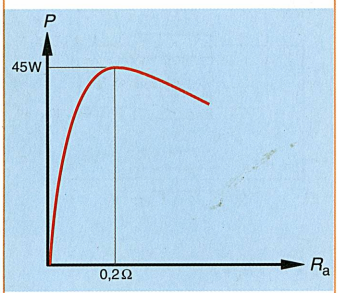
Eine Spannungsquelle ist durch folgende Größen charakterisiert: $U_Q = 6$ V, $R_i = 0{,}2\ \Omega$. Bei welchem äußeren Widerstand R_a ist die Leistung maximal?

$$P = \frac{(6\text{V})^2 R_a}{(R_a + 0{,}2\ \Omega)^2}$$

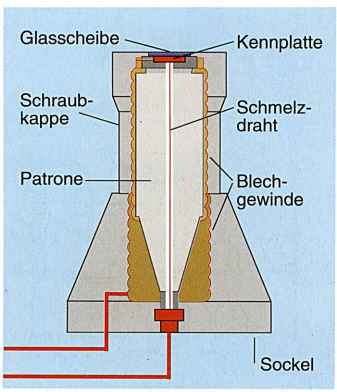
Nun berechnen wir die elektrischen Leistungen für Widerstandswerte zwischen 0,10 Ω und 0,55 Ω:

R_a in Ω	P in Watt
0,100	40,000
0,150	44,082
→ 0,200	45,000 ←
0,250	44,444
0,300	43,200
0,350	41,653
0,400	40,000
0,450	38,343
0,500	36,735
0,550	35,200

Die Leistung ist maximal, wenn der äußere Widerstand gleich dem inneren ist.



Leistungsdiagramm



30.1 Schmelzsicherung

Eine Spannungsquelle selbst besitzt aufgrund der Eigenschaften ihrer Bauteile einen Widerstand; z. B.: Leitungen in einem Generator, Elektrolyt in einer Batterie. Dieser elektrische Widerstand wird als *innerer Widerstand* bezeichnet.

Die "innere" Spannung einer Spannungsquelle wird als *Quellenspannung* U_Q bezeichnet. Diese wird wegen des inneren Widerstandes um den Wert $I\,R_i$ verringert.

Daher gilt für die an den Klemmen abgenommene *Klemmenspannung* U_a:

$$U_a = U_Q - I\,R_i$$

Bezüglich der Leistung gilt:

(1) $P = U_a\,I$

(2) $U_a = I\,R_a$

(3) $U_Q = I\,(R_a + R_i) \Leftrightarrow I = \dfrac{U_Q}{R_a + R_i}$

(1), (2), (3) $P = I^2 R_a = \dfrac{U_Q^2 R_a}{(R_a + R_i)^2}$

$$P = \frac{U_Q^2 R_a}{(R_a + R_i)^2}$$

Es kann nun gezeigt werden, daß die Leistung genau dann maximal ist, wenn der innere und der äußere Widerstand gleich groß sind (siehe Beispiel A in der Randspalte!).

Kurzschlußstrom

Werden die Klemmen ohne einen äußeren Widerstand (einen "Verbraucher") leitend verbunden, sagt man, sie sind *kurzgeschlossen*. Es fließt der *Kurzschlußstrom* I_K:

$$I_K = \frac{U_Q}{R_i}$$

Beispiel B

Eine Fahrzeugbatterie hat eine Quellenspannung von 12 V und einen inneren Widerstand von 0,05 Ω.

a) Berechne die Klemmenspannung, wenn eine Stromstärke von 10 A entnommen wird!

$U_a = UQ - I\,R_i$

$U_a = 12\text{ V} - 10\text{ A} \cdot 0{,}05\ \Omega = 11{,}5\text{ V}$

b) Wie groß ist der Kurzschlußstrom?

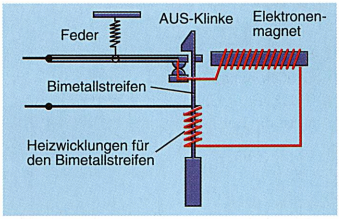
$$I_K = \frac{U_Q}{R_i}$$

$$I_K = \frac{12\text{ V}}{0{,}05\ \Omega} = 240\text{ A}$$

Für die meisten Spannungsquellen ist eine zu hohe Stromentnahme schädlich, ganz besonders der Kurzschluß. Um elektrische Anlagen vor Kurzschluß oder zu hoher Stromentnahme zu schützen, verwendet man Sicherungen.

Eine Form ist die *Schmelzsicherung* (Abb. 30.1). Diese besitzt einen dünnen Draht, der bei zu hoher Stromstärke durchschmilzt, wodurch der Stromkreis unterbrochen wird. Schmelzsicherungen dürfen nicht eigenständig durch Drähte überbrückt, "geflickt", werden.

Bei neuen Anlagen werden *Sicherungsautomaten* verwendet (Abb. 31.1). Im Stromkreis befinden sich die Wicklung eines Elektromagneten und die Heizwicklung eines Bimetallstreifens. Bei Überlastung wird der Bimetallstreifen durch die Heizwicklung so stark erwärmt, daß er sich krümmt. Als Folge öffnet sich der Stromkreis. Im Kurzschlußfall wird die AUS-Klinke durch den Elektromagneten angezogen, noch bevor sich der Bimetallstreifen gekrümmt hat. Da dabei kein Bauteil zerstört wird, können Sicherungsautomaten wartungsfrei über viele Jahre verwendet werden.



31.1 Schemadarstellung eines Sicherungsautomaten

Aufgabe

31. Ein Akkumulator weist bei einem Strom von 0,1 A eine Klemmenspannung von 5,97 V und bei einem Strom von 0,5 A eine von 5,85 V auf. a) Berechne den inneren Widerstand! b) Wie groß ist der Kurzschlußstrom?

2.8 Schaltungen von Widerständen

Serienschaltung

Versuch

Eine Spannungsquelle, zwei Widerstände, ein Amperemeter und drei Voltmeter werden miteinander verbunden, wie in Abb. 31.2 oben dargestellt.

Spannung kann nicht nur zwischen den Klemmen der Spannungsquelle, sondern auch an den Enden eines stromdurchflossenen Widerstandes gemessen werden. An jedem der beiden Widerstände gibt es einen Spannungsabfall. Die Summe der Spannungsabfälle an den Widerständen ist gleich der Klemmenspannung:

(1) $U = U_1 + U_2\,, \qquad U = I\,R$

Da die Stromstärke im ganzen Stromkreis gleich ist (es können keine Elektronen im Leiterkreis "verschwinden"), gilt:

(2) $U_1 = I\,R_1\,, \quad U_2 = I\,R_2$

(1), (2) $I\,R = I\,R_1 + I\,R_2$

$R = R_1 + R_2$

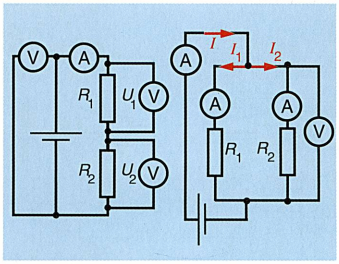
In einer Serienschaltung ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe der Einzelwiderstände: $R = \sum_j R_j$

Bildet man das Verhältnis der Teilspannungen, folgt:

$U_1 : U_2 = R_1 : R_2$

Die Teilspannungen verhalten sich wie die Widerstände (siehe Beispiel A in der Randspalte).

Je größer die Anzahl der hintereinander geschalteten Widerstände ist, umso kleiner ist die Stromstärke.



31.2 Serienschaltung und Parallelschaltung zweier Widerstände

Beispiel A

Zwei Widerstände $R_1 = 20\ \Omega$ und $R_2 = 30\ \Omega$ werden in Serie geschaltet. Die angelegte Spannung beträgt 80 V.

a) Wie groß sind die Teilspannungen an den Widerständen?

$U_1 : U_2 = R_1 : R_2$

$U_1 : U_2 = 20\ \Omega : 30\ \Omega \quad \Leftrightarrow \quad U_1 = \frac{2\,U_2}{3}$

$U_1 + U_2 = 80\ \text{V}$

$\frac{5\,U_2}{3} = 80\ \text{V}$

$U_2 = 48\ \text{V} \qquad U_1 = 32\ \text{V}$

b) Berechne den Gesamtwiderstand und die Stromstärke.

$R_1 + R_2 = 20\ \Omega + 30\ \Omega = 50\ \Omega$

$I = \frac{U}{R} = \frac{80\ \text{V}}{50\ \Omega} = 1{,}6\ \text{A}$

Parallelschaltung

Versuch

Eine Spannungsquelle, zwei Widerstände, drei Amperemeter und ein Voltmeter werden miteinander verbunden, wie in Abb. 31.2 unten dargestellt.

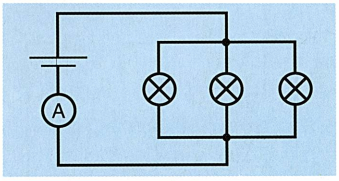
Der Gesamtstrom I teilt sich an der Stromverzweigung in zwei Teilströme I_1 und I_2 auf:

(1) $I = I_1 + I_2\,, \qquad I = \frac{U}{R}$

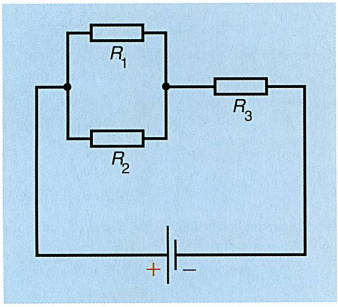
An beiden Widerständen liegt die gleiche Spannung U. Die Teilströme I_1 und I_2 ergeben sich als:

(2) $I_1 = \frac{U}{R_1}\,, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$

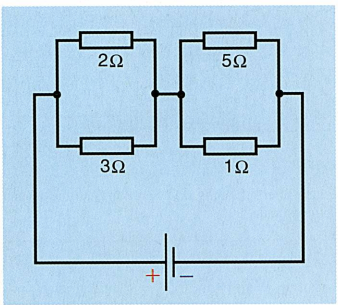
(1), (2) $\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$



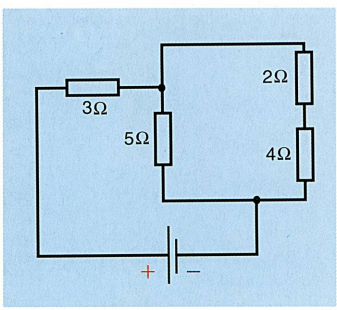
31.3 Jedes Lämpchen besitzt einen Widerstand R. Da die Lämpchen parallel geschaltet sind, sinkt der Gesamtwiderstand, je mehr Lämpchen leuchten. Entsprechend nimmt die Stromstärke zu, wie am Amperemeter abzulesen ist.



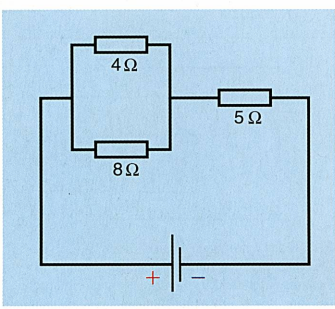
32.1 Abbildung zu Beispiel C



32.2 Abbildung zu Aufgabe 32



32.3 Abbildung zu Aufgabe 33



32.4 Abbildung zu Aufgabe 34

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

In einer Parallelschaltung ist der Kehrwert des Gesamtwiderstandes gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände: $\frac{1}{R} = \sum_j \frac{1}{R_j}$

Die Teilströme verhalten sich umgekehrt wie die Widerstände: $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$

➤ Beispiel B

Zwei Widerstände $R_1 = 20\ \Omega$ und $R_2 = 30\ \Omega$ werden parallel geschaltet. Die angelegte Spannung beträgt 80 V.

a) Berechne den Gesamtwiderstand.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Leftrightarrow \ldots \Leftrightarrow R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R = \frac{20\ \Omega \cdot 30\ \Omega}{20\ \Omega + 30\ \Omega} = 12\ \Omega$$

b) Ermittle die Stromstärken I_1, I_2 und die Gesamtstromstärke.

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{80\ \text{V}}{20\ \Omega} = 4\ \text{A}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{80\ \text{V}}{30\ \Omega} = 2{,}67\ \text{A}$$

$$I = I_1 + I_2 = 6{,}67\ \text{A}$$

c) Wie ändert sich die Gesamtstromstärke, wenn ein weiterer Widerstand von 50 Ω parallel geschaltet wird?

$$\frac{1}{R_g} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_3} \Leftrightarrow R_g = \frac{R R_3}{R + R_3}$$

$$R_g = \frac{50\ \Omega \cdot 12\ \Omega}{50\ \Omega + 12\ \Omega} = 9{,}68\ \Omega$$

$$I_g = \frac{80\ \text{V}}{9{,}68\ \Omega} = 8{,}3\ \text{A}$$

Bei der Parallelschaltung von Widerständen gilt: Der Gesamtwiderstand ist kleiner als jeder Einzelwiderstand. Durch jeden weiteren Widerstand erhöht sich die Stromstärke in der Zuleitung.

Beachte: In einem Stromkreis dürfen nicht zu viele Verbraucher parallel geschaltet werden, da sonst in der Zuleitung eine zu hohe Stromstärke auftritt.

Beispiel C

Berechne den Gesamtwiderstand der Schaltung von Abb. 32.1.
$R_1 = 15\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $R_3 = 10\ \Omega$

(1) $R = R^* + R_3$ (2) $R^* = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

(1), (2) $R = \frac{15\ \Omega \cdot 20\ \Omega}{15\ \Omega + 20\ \Omega} + 10\ \Omega = 18{,}57\ \Omega$

Aufgaben

32. Berechne den Gesamtwiderstand der Schaltung von Abb. 32.2!

33. Berechne den Gesamtwiderstand der Schaltung von Abb. 32.3!

34. Berechne die Spannung an jedem einzelnen Widerstand, wenn die angelegte Spannung 50 V beträgt (Abb. 32.4).

✗ **35.** In wieviel gleiche Teile muß ein Widerstandsdraht mit 200 Ω geteilt werden, damit bei einer Parallelschaltung dieser Teile ein Gesamtwiderstand von 2 Ω auftritt?

2.9. Schaltung von Meßgeräten

Ein Meßgerät in einem Stromkreis ist selbst wieder Teil dieses Systems. Das Gerät muß daher so dimensioniert sein, daß die Eigenschaften des Stromkreises nur sehr wenig verändert werden. Aus diesem Grund sind für Ampere- und Voltmeter Meßbereiche angegeben. Meistens besitzen die Meßgeräte mehrere Meßbereiche, die der Benutzer der Schaltung entsprechend einstellen kann.

Bei der *Messung der Stromstärke* wird festgestellt, wie viele Elektronen pro Sekunde durch den Leiterquerschnitt an einer Stelle des Stromkreises fließen. Dies bedeutet, daß durch das Amperemeter der gesamte Strom fließen muß. Daher wird es in Serie geschaltet. Der Stromfluß soll durch die Messung fast nicht verändert werden. Der stets vorhandene Innenwiderstand des Amperemeters muß somit möglichst klein sein.

➤ Beispiel A

Ein Amperemeter besitzt einen Innenwiderstand von 0,01 Ω. Es kann damit eine maximale Stromstärke von 2 A gemessen werden.
Der Meßbereich soll auf 10 A erweitert werden. Dies ist durch Parallelschaltung eines Widerstandes möglich (Abb. 33.1). Wird dieser klein gegenüber dem Innenwiderstand gewählt, fließt durch diesen ein Großteil des Stromes.

Für die Stromstärke I_p, die der Widerstand R_p aufnehmen muß, gilt:

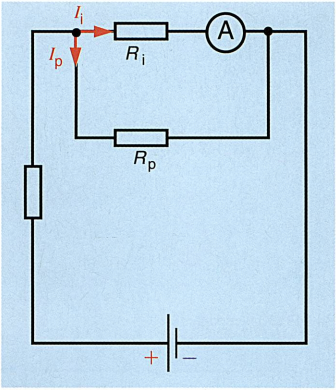
$I_p = 10\text{ A} - 2\text{ A} = 8\text{ A}$

Weiters gilt:

$$\frac{I_i}{I_p} = \frac{R_p}{R_i} \Leftrightarrow R_p = R_i \frac{I_i}{I_p}$$

$$R_p = 0{,}01\ \Omega \frac{2\text{ A}}{8\text{ A}} = 0{,}0025\ \Omega$$

Dieser Parallelwiderstand wird auch als *Shunt* bezeichnet. Der Meßbereich wird dadurch um den Faktor 5 vergrößert.



33.1 Abbildung zu Beispiel A

Bei einer *Spannungsmessung* wird die Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises ermittelt. Durch das Voltmeter soll nur ein kleiner Strom fließen. Es wird daher parallelgeschaltet. Ein Spannungsmeßgerät besitzt somit einen großen Innenwiderstand (siehe Beispiel B in der Randspalte).

Allgemein gilt:

Soll der Meßbereich eines Amperemeters mit dem Innenwiderstand R_i um das n-fache erweitert werden, muß ein Widerstand der Größe

$R_p = \frac{R_i}{n-1}$ parallelgeschaltet werden.

Soll der Meßbereich eines Voltmeters mit dem Innenwiderstand R_i um das n-fache erweitert werden, muß ein Widerstand der Größe $R_s = (n-1) \cdot R_i$ in Serie geschaltet werden.

Aufgaben

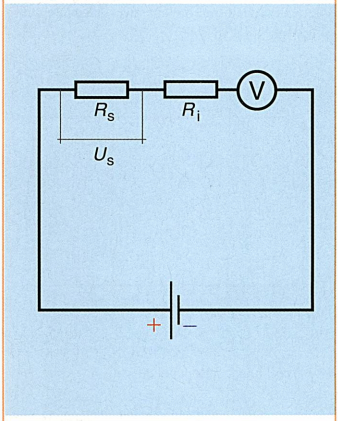
33. Der Meßbereich eines Voltmeters beträgt 3 V bei einem Innenwiderstand von 2 kΩ. Welcher Widerstand ist erforderlich, um den Meßbereich auf das Zehnfache zu erweitern?

34. Ein Amperemeter zeigt bei 4 mA Vollausschlag, wobei der Spannungsabfall am Meßgerät 100 mV beträgt. Welcher Widerstand ist nötig, um den Meßbereich auf das Zwanzigfache zu erweitern?

Beispiel B

Ein Voltmeter besitzt einen Innenwiderstand von 600 Ω und erlaubt die Messung einer Spannung von maximal 60 V. Der Meßbereich des Gerätes soll auf 300 V erweitert werden.

Dies ist durch einen in Serie geschalteten Vorwiderstand möglich.



An diesem Vorwiderstand muß die Spannung U_s abfallen:

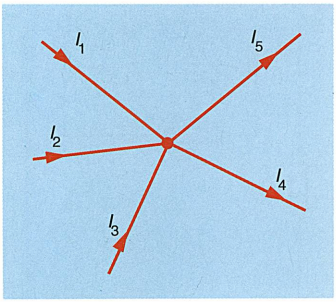
$U_s = 300\text{ V} - 60\text{ V} = 240\text{ V}$

Weiters gilt:

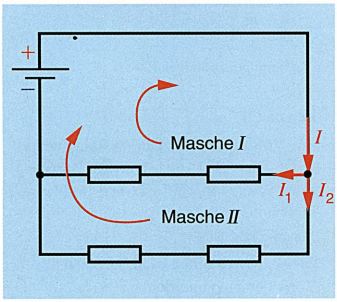
$$\frac{U_s}{U_i} = \frac{R_s}{R_i} \Leftrightarrow R_s = R_i \frac{U_s}{U_i}$$

$$R_s = 600\ \Omega \cdot \frac{240\text{ V}}{60\text{ V}} = 2400\ \Omega$$

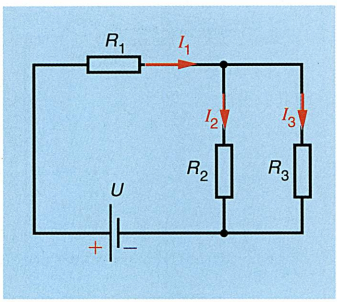
Der Meßbereich des Voltmeters wird durch diesen Widerstand um das 5-fache erweitert.



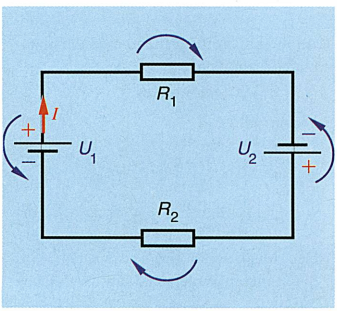
34.1 Ein Knotenpunkt



34.2 Eine Schaltung, die aus zwei Maschen aufgebaut ist



34.3 Abbildung zu Beispiel A



34.4 Abbildung zu Beispiel B

2.10 Die Kirchhoffschen Regeln

Um die Verhältnisse in Stromkreisen berechnen zu können, hat *Robert Kirchhoff* (1824 – 1887) zwei Grundregeln aufgestellt.

Erste Kirchhoffsche Regel

Einen Punkt, in welchem mehrere Stromzuflüsse und -abflüsse zusammentreffen, bezeichnet man als *Knotenpunkt* (Abb. 34.1). Aus dem Ladungserhaltungssatz folgt die *erste Kirchhoffsche Regel:*

Die Summe der Ströme, die auf einen Knotenpunkt zufließen, ist gleich der Summe der von diesem Punkt wegfließenden Ströme.
Die zufließenden Ströme erhalten positive, die wegfließenden negative Vorzeichen. Somit ist die algebraische Summe der Stromstärken Null.

$$\sum_i I_i = 0$$

Zweite Kirchhoffsche Regel

Ein geschlossener Stromkreis ohne Kreuzungen wird als *Masche* bezeichnet. Ein Strompfeil bezeichnet die Umlaufrichtung. Spannungen und Ströme der gleichen Richtung haben gleiche Vorzeichen. *Netzwerke* entstehen durch Zusammenschaltung mehrerer Maschen. Diese Betrachtungsweise führt zu einer Vereinfachung der Berechnung von Strömen und Spannungen in einem Netzwerk. Die *zweite Kirchhoffsche Regel* besagt:

Beim Umlaufen einer Masche ist die Summe aller Potentialanstiege U_i gleich der Summe aller Potentialabfälle $I_j R_j$; die Summe aller Spannungen ist Null.

$$\sum_i U_i - \sum_j I_j R_j = 0$$

➤ Beispiel A

Berechne die Ströme I_1, I_2 und I_3 mit $R_1 = 4\ \Omega$, $R_2 = 10\ \Omega$ und $R_3 = 20\ \Omega$, wenn die Spannung $U = 20$ V beträgt (Abb. 34.3).

Nach der ersten Kirchhoffschen Regel gilt: $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

Nach der zweiten Kirchhoffschen Regel gilt:

1. Masche: $U - I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0$

2. Masche: $U - I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0$

Man erhält ein Gleichungssystem in 3 Variablen:

$I_1 = I_2 + I_3$

$20 = 4 I_1 + 10 I_2$

$20 = 4 I_1 + 20 I_3$

$I_1 = 1{,}875$ A $\quad I_2 = 1{,}25$ A $\quad I_3 = 0{,}625$ A

Beispiel B

Berechne die Stromstärke in der Schaltung von Abb. 34.4.

$R_1 = 200\ \Omega$, $R_2 = 10\ \Omega$, $U_1 = 10$ V, $U_2 = 5$ V.

$U_1 + U_2 - I R_1 - I R_2 = 0$

$$I = \frac{U_1 + U_2}{R_1 + R_2}$$

$$I = \frac{10\ \text{V} + 5\ \text{V}}{20\ \Omega + 10\ \Omega} = 0{,}5\ \text{A}$$

Aufgaben

38. Berechne die Stromstärke I, wenn $R_1 = 40\ \Omega$, $R_2 = 20\ \Omega$, $R_3 = 10\ \Omega$, $U_1 = 25\ \text{V}$, $U_2 = 20\ \text{V}$ (Abb. 35.1).

39. Berechne die Ströme I_1, I_2 und I_3 mit $R_1 = 20\ \Omega$, $R_2 = 17\ \Omega$ und $R_3 = 12\ \Omega$, wenn die Spannung $U = 120\ \text{V}$ beträgt (Abb. 35.2).

2.11 Besondere Schaltungen

Potentiometerschaltung

Diese Schaltung wird dann verwendet, wenn die für einen Verbraucher benötigte Spannung kleiner als die unmittelbar verfügbare Spannung ist. Von dieser wird eine Teilspannung abgegriffen, es wird eine *Spannungsteilung* durchgeführt.

Versuch

Ein Schiebewiderstand R wird in einen Stromkreis geschaltet (Abb. 35.3) und eine Teilspannung U_1 abgegriffen. Verändert man den Widerstand R_1, ändert sich die Spannung.

Der Widerstand R ist in zwei Teilwiderstände R_1 und R_2 zerlegt worden. An jedem Widerstand erfolgt ein Spannungsabfall. Je größer der Widerstand R_1 ist, umso größer ist die Spannung U_1.

Da eine Serienschaltung vorliegt, gilt:

$$U_1 : U = R_1 : R \quad \Leftrightarrow \quad U_1 = \frac{U\,R_1}{R}$$

Die am Potentiometer abgegriffene Spannung U_1 verhält sich zur Gesamtspannung U wie der abgegriffene Widerstand R_1 zum Gesamtwiderstand R.

Wird ein Spannungsteiler *belastet*, treten geänderte Verhältnisse auf, wie das folgende Beispiel A zeigt.

➤ **Beispiel A** (Abb. 35.4)

$R_v = 12\ \Omega$, $R_1 = 4\ \Omega$, $R_2 = 8\ \Omega$, $U = 24\ \text{V}$

a) Berechne die Teilspannung an R_1 ohne Verbraucher R_V!

$$U_1 = \frac{U\,R_1}{R} = \frac{24\ \text{V} \cdot 4\ \Omega}{12\ \Omega} = 8\ \text{V}$$

b) Es wird ein Verbraucher mit einem Widerstand $R_v = 12\ \Omega$ parallel zu R_1 geschaltet. Wie groß ist dann die Teilspannung?

Der Gesamtwiderstand errechnet sich aus einer Serienschaltung des Widerstandes R_2 mit den beiden parallel geschalteten Widerständen R_1 und R_v.

$$R_p = \frac{R_1\,R_v}{R_1 + R_v} = \frac{4\ \Omega \cdot 12\ \Omega}{4\ \Omega + 12\ \Omega} = 3\ \Omega$$

$$R_g = R_p + R_2 = 3\ \Omega + 8\ \Omega = 11\ \Omega$$

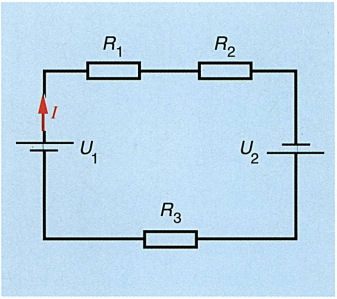
Für die Stromstärke I gilt:

$$I = \frac{U}{R_g} = \frac{24\ \text{V}}{11\ \Omega} = 2{,}18\ \text{A}$$

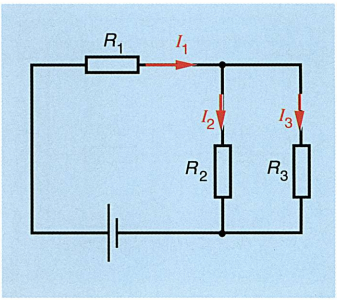
Für die Teilspannung U_1 folgt daraus:

$$U_1 = I\,R_p = 2{,}18\ \text{A} \cdot 11\ \Omega = 6{,}5\ \text{V}$$

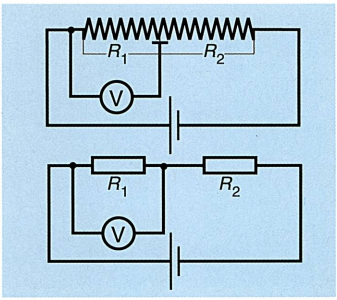
Beim belasteten Spannungsteiler ist die abgegriffene Teilspannung kleiner als beim unbelasteten. Je kleiner der Verbraucherwiderstand im Vergleich zum Potentiometerwiderstand ist, umso größer wird diese Differenz.



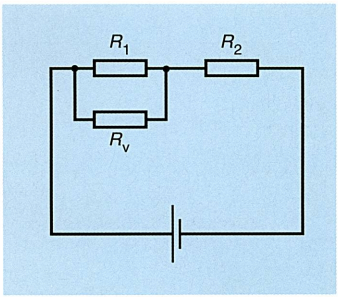
35.1 Abbildung zu Aufgabe 38



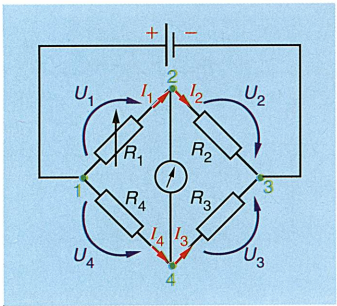
35.2 Abbildung zu Aufgabe 39



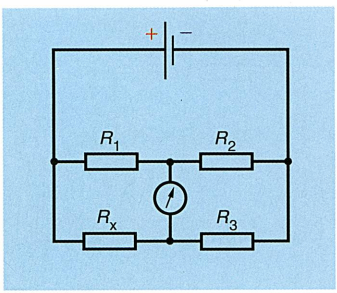
35.3 Potentiometerschaltung eines Schiebewiderstandes



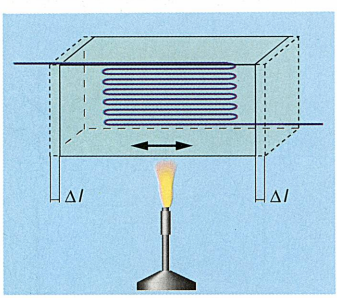
35.4 Abbildung zu Beispiel A



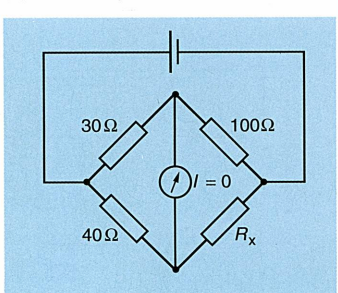
36.1 Wheatstonesche Brücke



36.2 Abbildung zu Beispiel B



36.3 Dehnungsmeßstreifen: Aus der Widerstandsänderung kann man auf die Längenänderung schließen. (Anwendung: Ausdehnung von Motorbauteilen, Brücken usw.)



36.4 Abbildung zu Aufgabe 40

Wheatstonesche Brücke

Diese Schaltung besteht aus 4 Widerständen und dient vor allem zur Messung eines unbekannten Widerstandes (Abb. 36.1).

Einer der Widerstände muß veränderlich sein, in Abb. 36.1 ist das R_1. Die Punkte 2 und 4 sind über ein empfindliches Amperemeter miteinander verbunden. Im allgemeinen besteht zwischen den beiden Punkten eine Potentialdifferenz, sodaß über das Meßgerät ein Strom fließt. Nun kann durch Änderung des Widerstandes R_1 in den Punkten 2 und 4 gleiches Potential erzeugt werden. Über das Amperemeter fließt dann kein Strom.

In diesem Fall gilt:

(1) $I_1 = I_2$ und $I_3 = I_4$

Nun wendet man die zweite Kirchhoffsche Regel an.

Kreis 1-2-4-1:

(2) $I_1 R_1 - I_4 R_4 = 0$

Kreis 2-3-4-2:

(3) $I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0$

Aus (1), (2), (3) folgt: $\dfrac{R_1}{R_2} = \dfrac{R_4}{R_3}$

Ist die Wheatstonesche Brücke stromlos, dann gilt die folgende Proportion:
$R_1 : R_2 = R_4 : R_3$

Beispiel B

Der spezifische Widerstand eines Leiters wird mit Hilfe einer Brückenschaltung bestimmt (Abb. 36.2). $R_1 = 52{,}7\ \Omega$, $R_2 = 47{,}6\ \Omega$, $R_3 = 63{,}6\ \Omega$

Der zu bestimmende Widerstand R_x hat folgende Abmessungen:

Drahtlänge $l = 1$ m, Durchmesser $d = 2{,}35 \cdot 10^{-4}$ m

(1) $R_1 : R_2 = R_x : R_3 \Leftrightarrow R_x = \dfrac{R_1 R_3}{R_2}$

(2) $R_x = \dfrac{\rho\, l}{A}$

(1), (2) $\dfrac{\rho\, l}{A} = \dfrac{R_1 R_3}{R_2} \Leftrightarrow \rho = \dfrac{R_1 R_3 A}{R_2\, l}$

$$\rho = \frac{52{,}7\ \Omega \cdot 63{,}6\ \Omega \cdot \left(\frac{2{,}35 \cdot 10^{-4}\ \text{m}}{2}\right)^2 \pi}{47{,}6\ \Omega \cdot 1\ \text{m}} \approx 3 \cdot 10^{-6}\ \Omega\ \text{m}$$

Der spezifische Widerstand beträgt $3 \cdot 10^{-6}\ \Omega$m.

Dehnungsmeßstreifen (DMS)

Zur Dehnungsmessung eines Materials benützt man die Änderung des elektrischen Widerstandes eines gezogenen Drahtes. Ein Dehnungsmeßstreifen besteht aus Kunstoff, in dem sich ein oftmals hin- und hergelegter Draht befindet (Abb. 36.3). Bei einer Längenänderung des Werkstoffes durch Temperaturerhöhung, statische oder dynamische Belastung wird der dünne Meßdraht gedehnt, wobei gleichzeitig eine Querkontraktion auftritt. Dadurch wird der elektrische Widerstand vergrößert. Dehnungsmeßstreifen werden auf die Prüfkörper geklebt. Der geänderte Widerstand kann mit Hilfe einer Brückenschaltung bestimmt werden. Aus der Widerstandsänderung schließt man auf die Längenänderung.

Aufgaben

40. Berechne den unbekannten Widerstand in der Schaltung von Abb. 36.4.

41. Welche Potentialdifferenz zeigt das Voltmeter zwischen den Punkten A und B ? (Abb. 37.1)

42. Potentiometerschaltung (Abb. 37.2): $R = 60\ \Omega$, $R_1 = 4\ \Omega$, $U = 80$ V.
a) Berechne die Teilspannung an R_1 ohne Verbraucher.
b) Wie groß ist die Teilspannung, wenn ein Widerstand $R_v = 20\ \Omega$ parallel zu R_1 geschaltet wird?

2.12 Kondensator im Gleichstromkreis

Versuch

Ein Widerstand, ein Kondensator und ein Amperemeter werden mit einer Spannungsquelle über einen Schalter verbunden (Abb. 37.3).

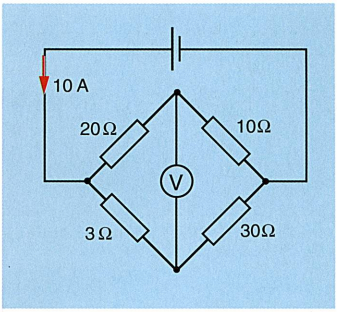
Befindet sich der Schalter in Position 1, wird der Kondensator geladen. Die Stromstärke nimmt rasch ab. Ist der Kondensator vollständig geladen, fließt kein Strom mehr. Ein Kondensator im Gleichstromkreis sperrt nach dem Ladevorgang den Stromkreis.

Dreht man nun den Schalter in Position 2, wirkt der Kondensator als Spannungsquelle. Es fließt so lange ein Strom in die entgegengesetzte Richtung, bis der Kondensator entladen ist. Der Stromverlauf kann in einem Diagramm dargestellt werden (Abb. 37.4).

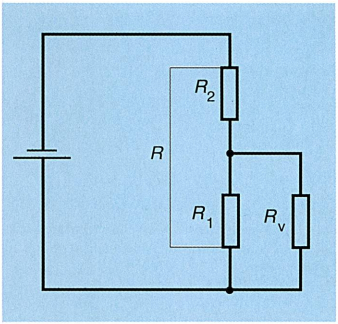
Kontrollfragen

1. Was versteht man unter dem Begriff "elektrische Stromstärke"?
2. Wie lautet die Einheit der Stromstärke?
3. Was sind Spannungsquellen?
4. Wie ist die technische Stromrichtung definiert?
5. Welche durchschnittliche Geschwindigkeit weisen Elektronen in einem metallischen Leiter auf?
6. Wie lautet das Ohmsche Gesetz? Erkläre den Begriff "elektrischer Widerstand".
7. Von welchen Größen hängt der elektrische Widerstand ab?
8. Wie funktioniert ein Widerstandsthermometer?
9. Was sind Kaltleiter, was Heißleiter?
10. Welche Bauformen von Widerständen gibt es?
11. Erkläre die Begriffe "elektrische Arbeit" und "elektrische Leistung".
12. Was versteht man unter dem inneren Widerstand einer Spannungsquelle?
13. Wann liefert eine Spannungsquelle maximale Leistung?
14. Wie berechnet sich der Gesamtwiderstand einer Serienschaltung von Widerständen?
15. Wie berechnet sich der Gesamtwiderstand einer Parallelschaltung von Widerständen?
16. Wie müssen Amperemeter und Voltmeter in einem Stromkreis geschaltet werden?
17. Erkläre, wie der Meßbereich eines Amperemeters und eines Voltmeters erhöht werden kann.
18. Gib die Kirchhoffschen Regeln an.
19. Erkläre den Aufbau einer Potentiometerschaltung.
20. Welcher Unterschied besteht zwischen dem unbelasteten und dem belasteten Spannungsteiler?
21. Erkläre den Aufbau einer Wheatstoneschen Brückenschaltung.
22. Was bewirkt ein Kondensator im Gleichstromkreis?

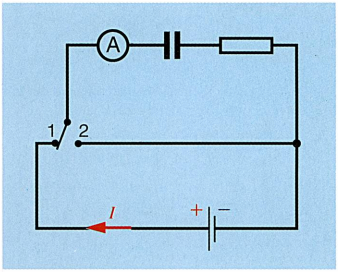
kommt schon



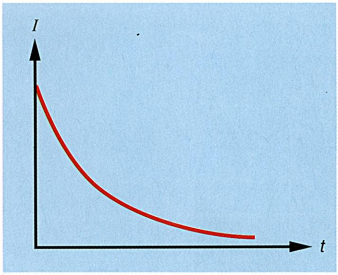
37.1 Abbildung zu Aufgabe 41



37.2 Abbildung zu Aufgabe 42



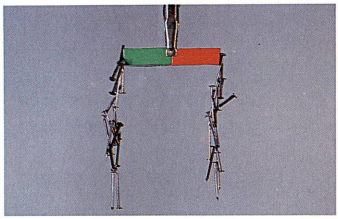
37.3 Nach der Aufladung sperrt der Kondensator den Stromkreis.



37.4 Diagramm zum Entladestrom eines Kondensators

3. Magnetisches Feld

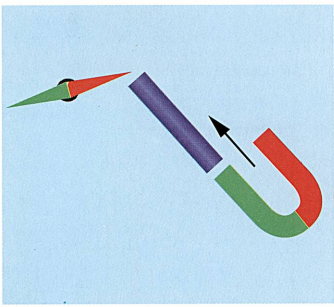
3.1 Grunderscheinungen des Magnetismus



38.1 Die Pole eines Magneten sind die Stellen der stärksten Anziehung.

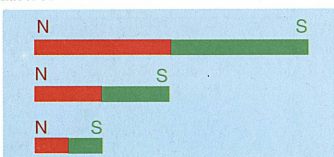
In der Nähe der Stadt *Magnesia* (Kleinasien) wurde im Altertum ein magnetisches Eisenerz (Magneteisenstein) gefunden. Dieser Magneteisenstein – oder auch ein künstlich hergestellter Magnet – hat die Eigenschaft, Stoffe wie Eisen, Kobalt, Nickel und verschiedene Legierungen anzuziehen. Man bezeichnet diese Stoffe als *ferromagnetisch.*

Die Stellen stärkster Anziehung bezeichnet man als die *Pole* des Magneten (Abb. 38.1). Eine Magnetnadel stellt sich auf der Erde annähernd in Nord-Süd-Richtung ein. Der nach Norden weisende Pol wird als *Nordpol*, der nach Süden zeigende als *Südpol* bezeichnet.



38.2 Das Weicheisenstück ist durch Influenz magnetisch geworden, wie die Ablenkung der Magnetnadel beweist.

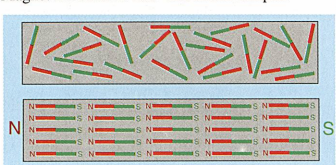
Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an. Zwischen zwei Magneten tritt daher entweder eine Abstoßung oder eine Anziehung auf. Ein Stück Eisen etwa, oder ein anderes ferromagnetisches Material, wird jedoch von beiden Polen eines Magneten angezogen. In der Nähe eines Magneten wird nämlich ein zunächst unmagnetisches ferromagnetisches Material selbst zu einem Magneten (Abb. 38.2). Diese Magnetisierung nennt man auch *magnetische Influenz*. *Permanentmagnete* (Dauermagnete) behalten nach der Magnetisierung über lange Zeit ihre magnetischen Eigenschaften.



38.3 Jedes Teilstück eines Magneten ist wieder ein Magnet mit einem Nord- und einem Südpol.

Jedes Teilstück eines Magneten ist wieder ein Magnet mit Nord- und Südpol. Magnetpole lassen sich nicht trennen, sie treten immer paarweise auf (Abb. 38.3). Ein Magnet mit Nord- und Südpol wird daher auch als *magnetischer Dipol* bezeichnet.

Diese Eigenschaften eines Magneten führen zu einer einfachen Modellvorstellung für ferromagnetische Stoffe. Jeder ferromagnetische Stoff besitzt kleinste magnetische Dipole, sogenannte *Elementarmagnete*. Ist der Stoff unmagnetisch, so sind diese Elementarmagnete völlig ungeordnet. In einem magnetischen Stoff sind sie ausgerichtet. Magnetisieren heißt Ordnen der Elementarmagnete. Entmagnetisierung bedeutet die Zerstörung dieser Ordnung. Diese Zerstörung der Ordnung kann durch Erwärmung, aber auch durch mechanische Erschütterungen erfolgen. Eine Temperaturerhöhung bewirkt eine Verstärkung der Wärmebewegung und damit eine Erniedrigung der Ordnung.



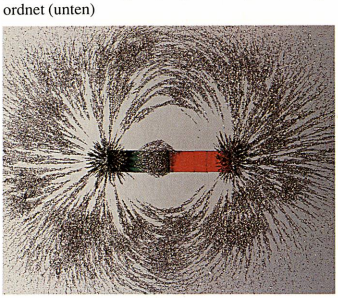
38.4 Elementarmagnete, ungeordnet (oben) und geordnet (unten)

3.2 Magnetische Felder

Das magnetische Feld eines Dauermagneten

Ein Magnet übt durch die Luft auf ein Stück Eisen eine Kraft aus. Aber auch durch andere Stoffe und durch den leeren Raum sind magnetische Kräfte wirksam. Um eine derartige Kraftwirkung beschreiben zu können, wurde – wie bei der Gravitationskraft und bei der elektrischen Kraft – der Begriff des *Feldes* eingeführt.

Jeder Magnet besitzt in seiner Umgebung ein magnetisches Feld.



38.5 Der Feldlinienverlauf kann durch Eisenfeilspäne sichtbar gemacht werden.

Ein Magnetfeld kann durch *Feld-* oder *Kraftlinien* anschaulich dargestellt werden. Mit Eisenfeilspänen kann der Feldlinienverlauf sichtbar gemacht werden (Abb. 38.5). Auch mit einer drehbaren Magnetnadel kann der Feldverlauf Punkt für Punkt untersucht werden. Eisenfeilspäne und Magnetnadel stellen sich tangential zur Feldlinie ein. Sie geben die Richtung der an dieser Stelle wirkenden Kraft an. Der Nordpol der Magnetnadel zeigt dabei in Feldrichtung.

Die magnetischen Feldlinien sind Linien, die außerhalb des Magneten vom Nordpol zum Südpol, und innerhalb des Magneten vom Südpol zum Nordpol verlaufen. Während eine elektrische Feldlinie an der positiven Ladung beginnt und an der negativen endet, sind magnetische Feldlinien *in sich geschlossen* (Abb. 39.2). Verlaufen Feldlinien parallel und in gleichem Abstand, dann nennt man das Feld *homogen*, anderenfalls *inhomogen.*

Das magnetische Feld eines stromdurchflossenen Leiters

Im Jahr 1820 entdeckte *Christian Oersted* (1777 - 1851), daß eine Magnetnadel in der Nähe eines Leiters abgelenkt wird, sobald durch diesen Strom fließt. Dies war die Geburtsstunde des *Elektromagnetismus.*

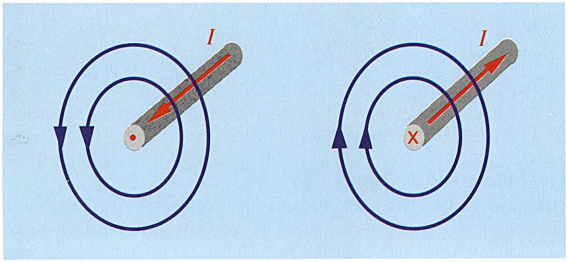
Versuch

Knapp über einer beweglichen Magnetnadel wird ein Leiter in Richtung der Magnetnadel angeordnet (Abb. 39.3). Wird der Stromkreis für den Leiter geschlossen und die Stromstärke erhöht, so verdreht sich die Magnetnadel, bis sie schließlich quer zum Leiter steht. Daraus kann geschlossen werden, daß der stromdurchflossene Leiter ein Magnetfeld besitzt, dessen Feldlinien quer zum Leiter verlaufen. Wird die Stromrichtung umgepolt, dann verdreht sich die Magnetnadel um 180°. Bei genügend großer Stromstärke ist der Einfluß des Erdmagnetfeldes vernachlässigbar.

Mit Hilfe von Eisenfeilspänen kann der Feldverlauf sichtbar gemacht werden (Abb. 39.4). Mit einer kleinen Magnetnadel kann der Feldverlauf "abgetastet" werden (Abb. 39.5).

Die magnetischen Feldlinien eines stromdurchflossenen Leiters sind konzentrische Kreise um den Leiter.

Die Feldlinienrichtung läßt sich mit der *Rechtsschraubenregel* ermitteln. Denkt man sich eine Rechtsschraube in die technische Stromrichtung in den Leiterquerschnitt hineingeschraubt, so fällt der Drehsinn mit dem Umlaufsinn der Feldlinien zusammen. Blickt man auf den Leiterquerschnitt, so bedeutet ein "x", daß der Strom vom Betrachter wegfließt, und ein "·", daß der Strom auf den Betrachter zufließt.



39.1 Vereinbarung: "x" bedeutet, die technische Stromrichtung weist vom Betrachter weg; "·" bedeutet, sie weist zu ihm hin.

Der Stromfluß in einem Leiter erzeugt in seiner Umgebung ein magnetisches Feld. Da der Stromfluß ja die Bewegung von Ladungsträgern ist, kann man verallgemeinern:

Jede bewegte elektrische Ladung erzeugt ein magnetisches Feld.

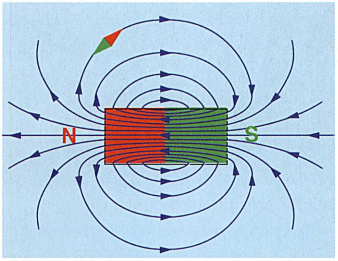
Eine ruhende elektrische Ladung besitzt nur ein elektrisches Feld.

Das Magnetfeld einer Leiterschleife

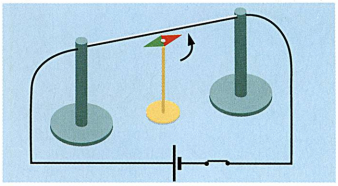
Versuch

Ein Leiter wird zu einer Schleife gebogen. Das Magnetfeld wird mittels Eisenfeilspänen oder mit einer kleinen Magnetnadel untersucht (Abb. 39.6).

Eine stromdurchflossene Schleife stellt einen "Kreisstrom" dar, der wie ein Magnet einen Nord- und Südpol besitzt. Dieser magnetische Dipol ist mit einem kurzen Stabmagneten vergleichbar. *André Marie Ampère* hat aufgrund dieser Beobachtung im Jahr 1820 die Vermutung geäußert, daß auch der Magnetismus eines Permanentmagneten auf elektrische Kreisströme zurückge-

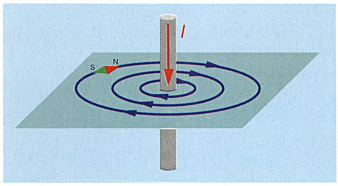


39.2 Magnetische Feldlinien sind in sich geschlossen. Die Magnetnadel hat sich tangential zur Feldlinie eingestellt, ihr Nordpol weist in die Feldrichtung.

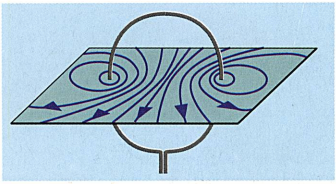


39.3 Schließt man den Stromkreis, wird die Magnetnadel aus der Nord-Süd-Richtung abgelenkt.

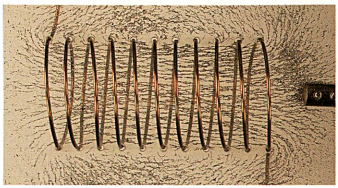
39.4 Die Eisenfeilspäne ordnen sich zu konzentrischen Kreisen um den Leiter.



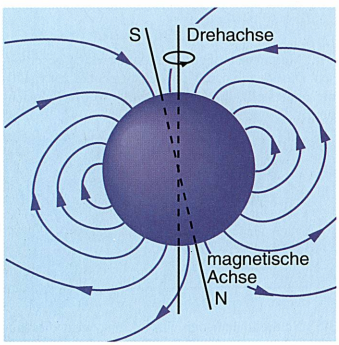
39.5 Das Magnetfeld wird mit einer Magnetnadel "abgetastet".



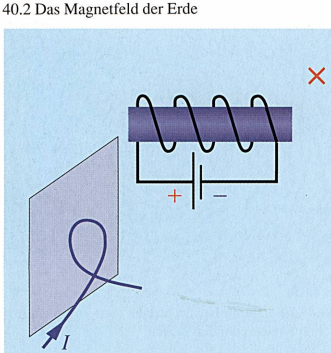
39.6 Das Magnetfeld einer Leiterschleife



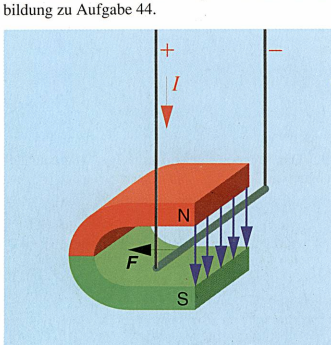
40.1 Das Magnetfeld einer Spule



40.2 Das Magnetfeld der Erde



40.3 Links: Abbildung zu Aufgabe 43. Rechts: Abbildung zu Aufgabe 44.



40.4 Fließt Strom durch den Leiter, wirkt eine Kraft auf ihn.

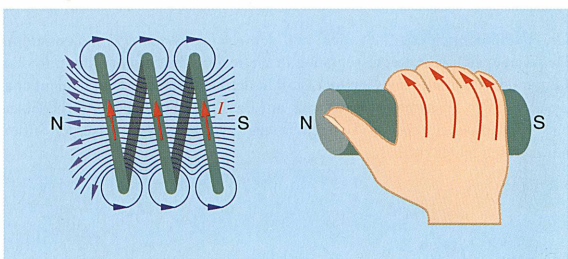
führt werden kann. Seit der Erforschung des Atombaus zu Beginn des 20. Jahrhunderts weiß man, daß die um den Atomkern kreisenden Elektronen derartige Kreisströme (magnetische Dipole) darstellen und auch für den Magnetismus verantwortlich sind (siehe Kapitel 3.5).

Das Magnetfeld einer Spule

Versuch

Vom Magnetfeld einer Spule, deren Windungen durch die Löcher einer Platte geführt werden, so daß die Spulenachse in der Platte liegt, kann mit Eisenfeilspänen ein Feldlinienbild erzeugt werden (Abb. 40.1).

Bei einer Spule überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Leiterschleifen (Abb. 40.5, links). Die Feldlinienrichtung und die Pole lassen sich mit der *Rechten-Faust-Regel* bestimmen. Umfaßt man die Spule mit der rechten Hand so, daß die Finger in Stromrichtung zeigen, dann weist der abgespreizte Daumen zum Nordpol und gibt die Feldlinienrichtung im Inneren an (Abb. 40.5, rechts). Im Inneren einer langen Zylinderspule ist das Magnetfeld nahezu homogen. Das Magnetfeld einer Spule entspricht dem Feld eines Dauermagneten. Außerhalb der Spule verlaufen die magnetischen Feldlinien vom Nordpol zum Südpol.



40.5 Links: In einer Spule überlagern sich die Magnetfelder der einzelnen Leiterschleifen. Rechts: Rechte-Hand-Regel für eine stromdurchflossene Spule.

Das Magnetfeld der Erde

Das Magnetfeld der Erde (Abb. 40.2) entspricht näherungsweise dem Feld eines Stabmagneten, dessen Achse um ca. 11° gegen die Rotationsachse der Erde geneigt ist (siehe auch Kapitel 3.3). Nicht nur der Mensch benützt dieses Magnetfeld zur Orientierung (Kompaß), sondern auch Zugvögel orientieren sich unter anderem mit dessen Hilfe.

Aufgaben

43. Wo befinden sich Nord- und Südpol der Leiterschleife (Abb. 40.3, links)?

44. Wie stellt sich die Magnetnadel an der bezeichneten Stelle ein (Abb. 40.3 rechts)?

Tx **45.** Was kann man beobachten, wenn man eine Magnetnadel an den oberen und dann an den unteren Rand eines eisernen Heizkörpers hält? Wie lassen sich die Beobachtungen erklären?

3.3 Kräfte im Magnetfeld

Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter

Versuch

Ein Leiter wird beweglich zwischen den Polen eines U-förmigen Dauermagneten aufgehängt. Leiter und Feldlinien bilden dabei einen Winkel von 90°. Bei Stromdurchgang wird der Leiter beschleunigt, das heißt, es wirkt eine Kraft auf ihn (Abb. 40.4). Wird die Stromrichtung umgepolt oder werden die Magnetpole vertauscht, dann wirkt auch die Kraft in umgekehrter Richtung.

Die Kraft steht normal auf die Feldrichtung und die Stromrichtung. Die Kraftrichtung kann mit Hilfe der *Rechten-Hand-Regel* bestimmt werden (Abb. 41.1).

Die Gesamtzahl aller Feldlinien in einer Spule oder zwischen den Polen eines U-förmigen Magneten bezeichnet man als den *magnetischen Fluß* Φ. Er ist damit ein Maß für die "Gesamtwirkung" des magnetischen Feldes. Ein Leiter im Magnetfeld wird nur von einem Teil der Feldlinien, also einem Teil des magnetischen Flusses, erfaßt. Die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter ist nun umso größer, je dichter die Feldlinien an der Stelle des Leiters beisammen liegen. Die Dichte der Feldlinien wird durch die *magnetische Flußdichte B* beschrieben (Abb. 41.2). *A* ist die Fläche, die vom Fluß senkrecht durchsetzt wird.

Stellt man ein Magnetfeld durch Feldlinien dar, dann wird der magnetische Fluß durch die Gesamtzahl der Feldlinien beschrieben, und die Flußdichte durch die Feldliniendichte. Die magnetische Flußdichte ist ein Maß für die Kraftwirkung des Feldes.

$$\text{magnetische Flußdichte} = \frac{\text{magnetischer Fluß}}{\text{Fläche}} \qquad B = \frac{\Phi}{A}$$

Durch Versuche läßt sich zeigen, daß die Kraft *F* auf einen stromdurchflossenen Leiter proportional ist zur Flußdichte *B*, zur Stromstärke *I* und zur wirksamen Leiterlänge *l* im Magnetfeld. Da die Flußdichte *B* noch nicht genauer festgelegt wurde, kann man den Proportionalitätsfaktor 1 wählen.

Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld *(elektrodynamisches Grundgesetz)*

$$F = B\,l\,I$$

Dieses Kraftgesetz stellt die theoretische Grundlage für den Elektromotor dar. Mit ihm kann auch die magnetische Flußdichte definiert werden.

Definition der magnetischen Flußdichte B

$$B = \frac{F}{l\,I}$$

$$[B] = \frac{\text{N}}{\text{A m}} = \frac{\text{J}}{\text{A m}^2} = \frac{\text{V As}}{\text{A m}^2} = \frac{\text{V s}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Tesla (1 T)}$$

Wie die Kraft ***F*** ist die magnetische Flußdichte ***B*** durch Betrag und Richtung gekennzeichnet, also eine vektorielle Größe. Sie wird auch als magnetischer Feldvektor bezeichnet.

Definition des magnetischen Flusses Φ

$$\Phi = B\,A$$

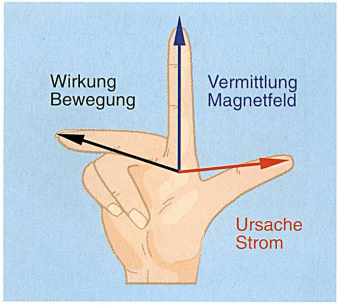
$$[\Phi] = \frac{\text{V s}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^2 = \text{V s} = 1 \text{ Weber (1 Wb)}$$

➤ Beispiel A

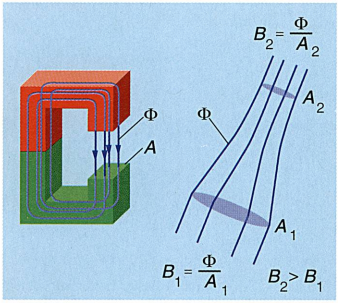
a) In einem homogenen Magnetfeld ($B = 0{,}05$ T) hängt ein Leiterstück mit einer wirksamen Länge von 20 mm senkrecht zu den Feldlinien an einem Kraftmesser mit einer Federkonstante 5 N/m. Um welches Stück x verschiebt sich der Leiter bei einem Stromfluß von 5 A nach unten (Abb. 41.4,)?

(1) $F = B\,l\,I$ (2) $F = k\,x \Leftrightarrow x = \frac{F}{k}$

(1), (2) $x = \frac{B\,l\,I}{k} = \frac{0{,}05 \text{ V s m}^{-2} \cdot 0{,}02 \text{ m} \cdot 5 \text{ A}}{5 \text{ N m}^{-1}} = 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$



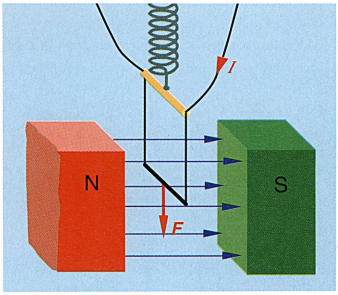
41.1 Mit der Rechten-Hand-Regel (Motorregel) kann man die Orientierung der elektrodynamischen Kraft bestimmen. – Die ersten drei Finger der rechten Hand stehen paarweise normal aufeinander. Zeigt der Daumen in Richtung der Ursache (technische Stromrichtung), der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes, dann zeigt der Mittelfinger in Richtung der Kraft, welche auf den stromdurchflossenen Leiter ausgeübt wird.



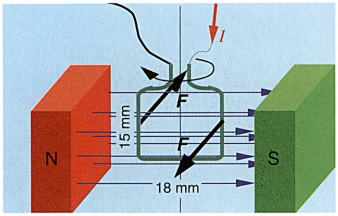
41.2 In einem homogenen Feld ist die magnetische Kraftflußdichte konstant (links), in einem inhomogenen veränderlich (rechts).

Erreger des Magnetfeldes	Flußdichte in T
Erde	$5 \cdot 10^{-5}$ T
Elektromotor	1 T
Dauermagnet	0,1 T
Kernspintomograph	1 T

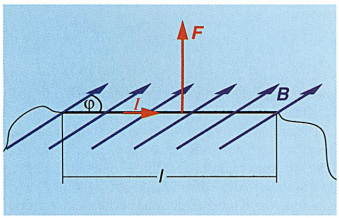
41.3 Beispiele für die magnetische Flußdichte



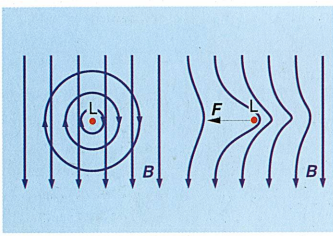
41.4 Abbildungen zu Beispiel A



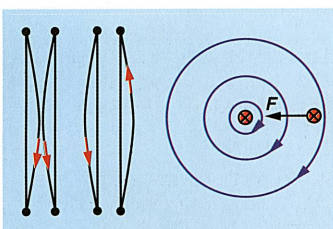
42.1 Abbildung zu Beispiel B



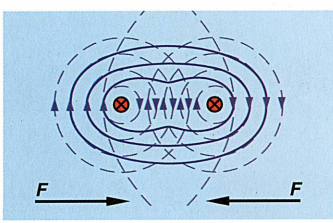
42.2 Verallgemeinerung des elektrodynamischen Grundgesetzes: I und B stehen nicht normal aufeinander.



42.3 Links: Stromdurchflossener Leiter mit seinem zirkularen Magnetfeld in einem homogenen Magnetfeld. Rechts: Überlagerung dieser beiden Felder.



42.4 Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern



42.5 Die resultierenden Feldlinien umschlingen beide Leiter.

b) Nun wird anstelle des Leiterstückes eine Spule mit 50 Windungen teilweise in das Magnetfeld eingetaucht. Welche Stromstärke muß eingestellt werden, damit wieder die gleiche Verschiebung x auftritt?

Da das Leiterstück durch eine Spule mit 50 Windungen ersetzt wurde, ist die wirksame Länge 50mal so groß. Das elektrodynamische Grundgesetz für eine Spule mit N Windungen lautet daher: $F = B\,l\,I\,N$.
Nun zum eigentlichen Beispiel:

(1) $F = B\,l\,I$ (2) $F = B\,l\,I^*\,N$

(1), (2) $B\,l\,I = B\,l\,I^*\,N \quad \Leftrightarrow \quad I^* = \frac{I}{N} = \frac{5\text{ A}}{50} = 0{,}1\text{ A}$

Beispiel B

Welches Drehmoment wirkt auf die Drehspule mit 15 Windungen bei einer Stromstärke von 60 mA, wenn die Flußdichte 0,1 T beträgt (Abb. 42.1)?

$M = F\,d = B\,l\,I\,N\,d = 0{,}1\text{ T} \cdot 0{,}015\text{ m} \cdot 0{,}06\text{ A} \cdot 15 \cdot 0{,}018\text{ m} =$
$= 2{,}4 \cdot 10^{-5}\text{ Nm}$

Die Formel $F = B\,l\,I$ gilt nur für den Fall, daß der stromdurchflossene Leiter auf die Feldlinien normal steht. Schließt der Leiter mit den Feldlinien den Winkel φ ein (Abb. 42.2), dann gilt:
$F = B\,l\,I \sin\varphi$

Die elektrodynamische Kraft ist bei $\varphi = 90^\circ$ am größten, bei $\varphi = 0^\circ$ ist sie Null (die Feldlinien verlaufen parallel zum Leiter).
Mit Hilfe des Feldlinienmodells kann die Kraftwirkung anschaulich dargestellt werden: Abb. 42.3 links zeigt das homogene Magnetfeld B und den stromdurchflossenen Leiter mit seinem zirkularen Magnetfeld. Abb. 42.3 rechts zeigt die Überlagerung der beiden Felder. Rechts vom Leiter sind die beiden Felder etwa gleichgerichtet, daher addieren sich ihre Wirkungen. Links sind die beiden Einzelfelder etwa entgegengerichtet, was zu einer Schwächung führt. Feldlinien üben quer zu ihrer Richtung Druckkräfte aus. Feldlinien sind vergleichbar mit gespannten Gummischnüren, sie haben die Tendenz zur Linienverkürzung. Längs der Feldlinien besteht eine Zugkraft.

Kräfte zwischen stromdurchflossenen Leitern

Versuch

Zwei bewegliche Leiter werden knapp nebeneinander aufgehängt. Werden beide Leiter in gleicher Richtung vom Strom durchflossen, ziehen sie sich gegenseitig an. Bei entgegengesetzter Stromrichtung kommt es zu einer Abstoßung.
Zur Erklärung kann man die Rechte-Hand-Regel benützen. Man stellt sich etwa den linken Leiter festgehalten vor. In seinem Magnetfeld befindet sich der rechte in gleicher Richtung vom Strom durchflossene Leiter. Nach der Rechten-Hand-Regel wirkt auf den rechten Leiter eine Kraft nach links (Abb. 42.4). Aber auch der Feldlinienverlauf liefert eine Erklärung. Die Magnetfelder der beiden Leiter überlagern sich. Werden die Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen, dann umschlingen die resultierenden Feldlinien die Leiter (Abb. 42.5). In Feldlinienrichtung herrscht ein Zug, daher kommt es zur Anziehung. Die Erklärung der Kraftwirkung durch den Feldverlauf zeigt sehr deutlich:

Kräfte können durch Felder übertragen werden.

Einheit der Stromstärke

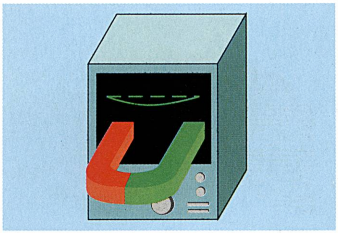
Die Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern wird dazu benützt, um die Grundeinheit 1 Ampere zu definieren:

1 Ampere (1 A) ist die Stromstärke, die durch zwei geradlinige dünne unendlich lange, im Abstand von 1 m im Vakuum angeordnete Leiterstücke fließen muß, damit diese aufeinander eine Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N je 1 m Länge ausüben.

Kräfte auf bewegte Ladungen

Versuch

Hält man einen Dauermagneten zum Schirm eines Oszilloskops, so wird der Elektronenstrahl abgelenkt. So wird etwa ein zunächst gerader Strich am Schirm "verbogen" (Abb. 43.1).



43.1 Der Elektronenstrahl wird durch das Magnetfeld abgelenkt.

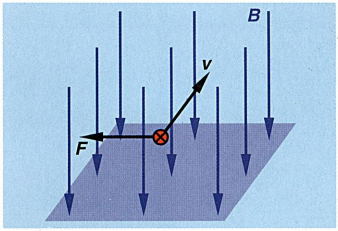
Um die Kraft auf eine bewegte Ladung zu berechnen, geht man vom stromdurchflossenen Leiter aus.

(1) $F = B\,l\,I$ (2) $I = \frac{Q}{t}$ (3) $v = \frac{l}{t} \Leftrightarrow l = v\,t$

(t ist die Zeit, welche die Ladung Q benötigt, die Strecke l zurückzulegen.)

(1), (2), (3) $F = B\,v\,t\,\frac{Q}{t} = B\,v\,Q$

Lorentzkraft
Darunter versteht man die Kraft F, welche auf eine Ladung Q wirkt, die sich mit der Geschwindigkeit v senkrecht zum Magnetfeld bewegt.
$F = Q\,v\,B$



43.2 Die Orientierung der Lorentzkraft kann mit der Rechten-Hand-Regel gefunden werden.

Die Richtung der Lorentzkraft kann mit Hilfe der Rechten-Hand-Regel gefunden werden. Der Kraftvektor $\boldsymbol{F}$ steht normal auf dem Geschwindigkeitsvektor $\boldsymbol{v}$ und dem Feldvektor $\boldsymbol{B}$ (Abb. 43.2). Da wir bei der Bestimmung der Kraftrichtung von einem stromdurchflossenen Leiter ausgegangen sind, bezieht sich die ermittelte Kraftrichtung auf bewegte positive Ladungsträger, denn dies entspricht der technischen Stromrichtung. Betrachtet man die Bewegung von Elektronen, dann ist zu beachten, daß die technische Stromrichtung der Elektronenbewegung entgegengerichtet ist. Auf einen Leiter im Magnetfeld wirkt nur dann eine Kraft, wenn er stromdurchflossen ist, das heißt, wenn es eine Elektronenbewegung gibt. Das bedeutet aber, daß die Kraftwirkung auf den Leiter eigentlich durch die Kraftwirkung auf seine bewegten Elektronen zurückzuführen ist. Daher kann man verallgemeinern:

Ein Magnetfeld ist eine Eigenschaft des Raumes, die durch die Kraftwirkung auf bewegte Ladungen gekennzeichnet ist.

Im Gegensatz dazu treten im elektrischen Feld Kraftwirkungen sowohl auf ruhende als auch auf bewegte Ladungen auf.

Versuch

Im *Fadenstrahlrohr* kann die Ablenkung von Elektronen im Magnetfeld sehr schön beobachtet werden (Abb. 44.1). Die aus der Glühkathode austretenden Elektronen werden im Wehneltzylinder zu einem dünnen fadenförmigen Strahl gebündelt. Durch die Anodenspannung werden die Elektronen beschleunigt. Das Fadenstrahlrohr besitzt eine Gasfüllung mit einem ganz bestimmten Druck. Trifft ein Elektron auf ein Gasmolekül, so wird dieses zum Leuchten angeregt. Auf diese Weise wird die Bahn der Elektronen sichtbar gemacht. Mit den sogenannten Helmholtzspulen wird ein homogenes Magnetfeld erzeugt. Ohne Magnetfeld ist der geradlinige Verlauf des Elektronenstrahls zu beobachten. Stehen die magnetischen Feldlinien senkrecht auf dem Elektronenstrahl, dann kann dieser auf eine Kreisbahn gezogen werden. Durch Verdrehen des Fadenstrahlrohres kann der Winkel zwischen Elektronenstrahl und Magnetfeld verändert werden. Beträgt der Winkel nicht 90°, bewegen sich die Elektronen entlang einer Schraubenlinie.

Beispiel C

In einem Fadenstrahlrohr werden Elektronen durch eine Anodenspannung von 150 V beschleunigt und durch ein Magnetfeld auf eine Kreisbahn von 5 cm Radius gezwungen. Die magnetische Flußdichte beträgt $8{,}2 \cdot 10^{-4}$ T. Die spezifische Ladung des Elektrons (e/m) ist zu berechnen.

Zwischen Katode und Anode wird das Elektron durch die Anodenspannung U beschleunigt.
Die kinetische Energie des Elektrons nach dem "Durchfallen" der Potentialdifferenz U ist gleich der Arbeit eU, die im elektrischen Feld verrichtet wurde:

(1) $\frac{1}{2}\,m\,v^2 = e\,U$

Die für das Durchlaufen einer Kreisbahn erforderliche Zentripetalkraft ist die Lorentzkraft:

(2) $\frac{m\,v^2}{r} = e\,v\,B \Leftrightarrow \frac{e}{m} = \frac{v}{B\,r}$

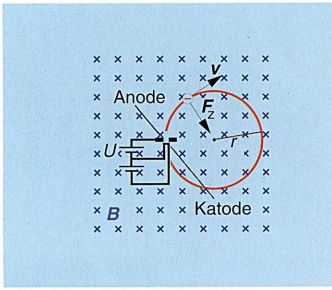
Dividiert man (2) durch (1), erhält man:

(3) $\frac{2}{r} = \frac{v\,B}{U} \Leftrightarrow v = \frac{2\,U}{B\,r}$

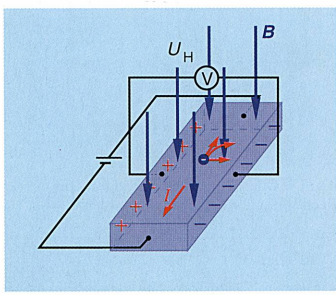
(2), (3) $\frac{e}{m} = \frac{2\,U}{B^2\,r^2} =$

$= \frac{2 \cdot 150\ \text{V}}{(8{,}2 \cdot 10^{-4}\ \text{T})^2 \cdot (0{,}05\ \text{m})^2} =$

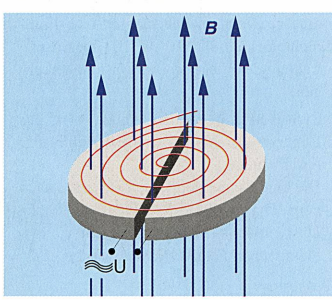
$= 1{,}78 \cdot 10^{11}\ \text{As/kg}$



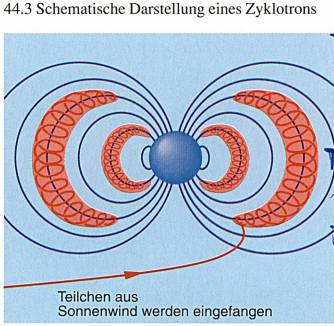
44.1 Ablenkung eines Elektronenstrahls im Fadenstrahlrohr



44.2 Halleffekt: Quer zur Stromrichtung entsteht aufgrund der Lorentzkraft, die auf die Elektronen wirkt, die Hallspannung U_H.



44.3 Schematische Darstellung eines Zyklotrons



44.4 Innerer und äußerer Strahlungsgürtel der Erde. Sie wurden 1959 von *Van Allen* entdeckt.

Halleffekt

Ein in Längsrichtung vom Strom I durchflossenes Metallplättchen wird in ein Magnetfeld gebracht, dessen Feldlinien senkrecht zur Plattenebene verlaufen (Abb. 44.2). An den gegenüberliegenden Stirnflächen, quer zur Stromrichtung, tritt die sogenannte Hallspannung U_H auf. Auf die bewegten Elektronen wirkt im Magnetfeld die Lorentzkraft, senkrecht zur Strom- und zur Feldlinienrichtung. Daher werden die Elektronen bei der im Bild getroffenen Anordnung nach rechts abgelenkt. Dadurch tritt an der rechten Stirnseite ein Elektronenüberschuß und an der linken Stirnseite ein Elektronenmangel auf. Eine Folge dieser Ladungsunterschiede ist die Hallspannung U_H. Bei Halbleitern ist die Hallspannung wesentlich größer als bei Metallen. Die Hallspannung ist proportional zur Flußdichte: $U_H \sim B$. Daher ist ein Hallplättchen (die Hallsonde) zur Messung der magnetischen Flußdichte geeignet.

Zyklotron

Das Zyklotron dient zur Beschleunigung von geladenen Teilchen. Zwischen zwei hohlen, halbkreisförmigen Metallelektroden liegt eine Wechselspannung, die eine Beschleunigung der Teilchen bewirkt (Abb. 44.3). Ein senkrecht dazu wirkendes Magnetfeld zwingt die Teilchen auf eine Kreisbahn. Auf diese Weise wird erreicht, daß das Teilchen die Beschleunigungsstrecke zwischen den beiden Elektroden wiederholt durchquert. Dabei wird jedesmal die Geschwindigkeit (Energie) des Teilchens erhöht. Dadurch wächst aber der Bahnradius an. Die Teilchen durchlaufen eine Art Spiralbahn. Damit ein Teilchen nach dem Durchlaufen einer halbkreisförmigen Elektrode im Bereich zwischen den Elektroden wieder beschleunigt wird, muß die Spannung umgepolt werden, daher die Wechselspannung. Das Zyklotron wird als Teilchenbeschleuniger in der Kernphysik verwendet.

Die Strahlungsgürtel der Erde (Van-Allen-Gürtel)

Von der Sonne werden ständig Teilchen nach allen Richtungen weggeschleudert. Dieser sogenannte *Sonnenwind* besteht im wesentlichen aus Protonen und Elektronen. Diese geladenen Teilchen werden vom Magnetfeld der Erde eingefangen und bewegen sich auf schraubenartigen Bahnen um die magnetischen Feldlinien zwischen Nord- und Südpol (Abb. 44.4). Diese Zonen hoher Dichte an geladenen Teilchen wurden durch die ersten Erdsatelliten nachgewiesen. Das Erdmagnetfeld schützt uns vor einem Großteil der energiereichen und damit gefährlichen Teilchen des Sonnenwindes. Unter dem Einfluß des Sonnenwindes kommt es auch zu einer Verformung des Erdmagnetfeldes. Auf der sonnenzugewandten Seite wird das Magnetfeld komprimiert, auf der sonnenabgewandten Seite zieht der Sonnenwind die Magnetosphäre in Form eines magnetischen Schweifs in die Länge.

Aufgaben

46. Wie verhalten sich die magnetischen Flüsse und die Flußdichten in den beiden Fällen (Abb. 45.1)?

47. Ein homogenes Magnetfeld durchsetzt senkrecht eine Fläche von 100 cm^2. Wie groß ist der magnetische Fluß, wenn die Flußdichte 0,5 T beträgt?

48. In welche Richtung wird der Leiter abgelenkt (Abb. 45.2, links)?

49. Welche Kraft wirkt auf die beiden Leiterrahmen, wenn die Stromstärke 3 A und die Flußdichte 0,42 T beträgt (Abb. 45.2, rechts)?

50. In Beispiel A auf Seite 41 wurde die Kraftwirkung auf das horizontale Leiterstück berechnet, nicht aber die Kraftwirkung auf die beiden seitlichen Zuleitungen, die teilweise in das Magnetfeld eintauchen. Was ist dazu zu sagen?

51. Die Drehspule des Beispiels B auf Seite 42 schließt mit den Feldlinien einen Winkel von a) 45°, b) 90° ein. Berechne das Drehmoment für die beiden Fälle.

52. Ein Elektronenstrahl wird in eine Zylinderspule in Richtung der Spulenachse hineingeschossen. Welche Bahn beschreibt der Elektronenstrahl?

53. Bei einem Versuch mit dem Fadenstrahlrohr werden die Elektronen auf eine Kreisbahn mit einem bestimmten Radius gezwungen. Wie ändert sich die Bahn, wenn unter sonst gleichen Bedingungen die Anodenspannung vergrößert bzw. verkleinert wird?

54. In ein Magnetfeld werden einmal Elektronen ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As, $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg) und dann Protonen ($m_p = 1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg) mit jeweils gleichen Geschwindigkeiten eingeschossen. Wie unterscheiden sich ihre Bahnen?

55. Wie ändert sich die Energie eines Elektrons nach dem Durchlaufen einer Kreisbahn in einem homogenen Magnetfeld? Begründe die Antwort!

56. Ein Elektronenstrahl durchquert – senkrecht zu den Feldlinien – einen Bereich mit einem homogenen Magnetfeld. Skizziere eine mögliche Bahn im Feldbereich und nach dem Verlassen des Bereiches für zwei verschiedene Flußdichten (Abb. 45.3).

57. In einem Fadenstrahlrohr werden die Elektronen durch eine Spannung von 200 V beschleunigt und durch ein Magnetfeld auf eine Kreisbahn von 3 cm Radius gezwungen. Wie groß muß die magnetische Flußdichte sein?

58. a) Welche Umlaufzeit besitzt ein Proton in einem Zyklotron bei einer Flußdichte von 0,5 T?
b) Wie groß muß die Frequenz der Beschleunigungsspannung sein?
c) Welchen Einfluß hat der Bahnradius auf die Umlaufzeit?

59. Ein Proton durchquert mit einer Geschwindigkeit von 30 000 km/s senkrecht einen Bereich, in dem sich ein elektrisches und ein magnetisches Feld kreuzen (Abb. 45.4). Bei welchem Verhältnis von E/B wird die resultierende Kraft Null? Zeichne in einer Skizze den elektrischen und den magnetischen Kraftvektor ein. Diese Anordnung gekreuzter Felder kann dazu benützt werden, um Teilchen bestimmter Geschwindigkeit zu selektieren.

34. Die magnetische Feldstärke (magnetische Erregung)

Im letzten Abschnitt haben wir die magnetische Flußdichte B als Maß für die Kraftwirkung eines Magnetfeldes kennengelernt. Jetzt soll die Ursache für das Magnetfeld genauer untersucht werden.

Das Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters

Jeder stromdurchflossene Leiter erregt in seiner Umgebung ein magnetisches Feld. Versuche zeigen, daß die Kraftwirkung und damit auch die Flußdichte B direkt proportional zur Erregerstromstärke I und verkehrt proportional zur Feldlinienlänge l ist: $B \sim \frac{I}{l}$. Die Feldlinien verlaufen als konzentrische Kreise um den Leiter. Aus $l = 2\,\pi\,r$ folgt, daß B auch zu r verkehrt proportional ist (Abb. 45.5).

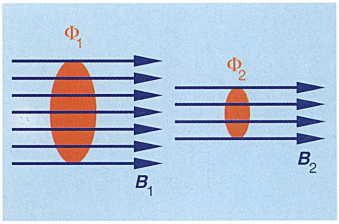
Wählt man einen Proportionalitätsfaktor μ_o, kann man das Ergebnis dieser Versuche in Form einer Gleichung anschreiben:

$$B = \mu_o \frac{I}{l} = \mu_o \frac{I}{2\,\pi\,r}$$

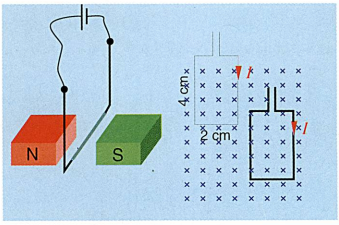
B ist die magnetische Feldflußdichte B eines geraden Stromleiters. μ_o heißt *magnetische Feldkonstante* oder *absolute Permeabilität*.

$$\mu_o = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\text{V s}}{\text{A m}}$$

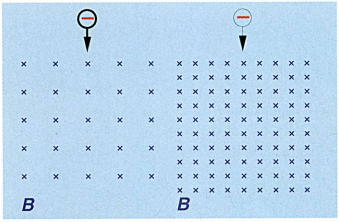
Die eigentliche Ursache für das magnetische Feld ist der Stromfluß, ausgedrückt durch die Stromstärke I. Um auch die "Geometrie" zu berücksichtigen, faßt man Stromstärke I und Feldlinienlänge l zu einer neuen Größe, zur *magnetischen Erregung H*, zusammen.



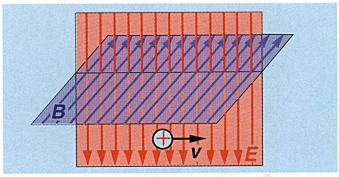
45.1 Abbildung zu Aufgabe 46



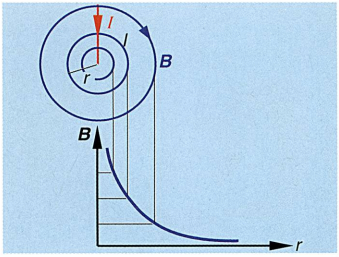
45.2 *Links:* Abbildung zu Aufgabe 48 - *rechts*: Abbildung zu Aufgabe 49



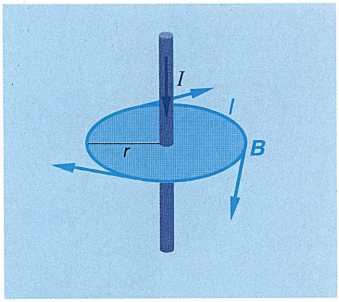
45.3 Abbildung zu Aufgabe 56



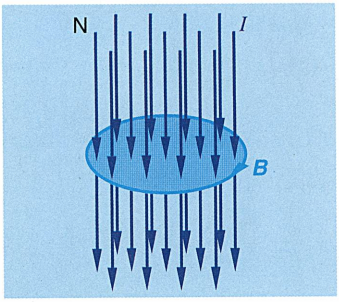
45.4 Abbildung zu Aufgabe 59



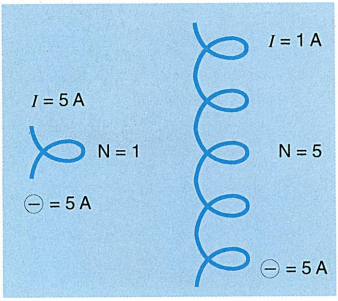
45.5 Man kann sich vorstellen, daß durch den Stromfluß I elektrische Energie zugeführt wird, die sich auf die Feldlinienlänge l verteilt. Mit zunehmender Entfernung vom stromdurchflossenen Leiter sinkt daher die Flußdichte B ab.



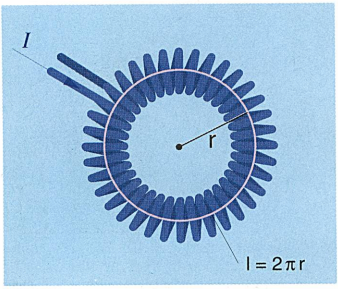
46.1 Abbildung zu Beispiel A



46.2 Durchflutung Θ



46.3 Die Durchflutung Θ beträgt in beiden Fällen 5 A.



46.4 Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Ringspule

Magnetische Erregung oder *magnetische Feldstärke* eines geraden stromdurchflossenen Leiters

$H = \frac{I}{l}$ $\qquad [H] = 1\ \mathrm{A/m}$

Die magnetische Erregung ist die Ursache für das Magnetfeld. Sie ist gleich dem Wert der auf die Feldlinienlänge l verteilten Stromstärke I. Je kürzer der Weg entlang einer Feldlinie ist, desto größer ist die magnetische Erregung.

Magnetische Erregung H und Flußdichte B sind durch die magnetische Feldkonstante miteinander verknüpft:

$$B = \mu_0 H$$

Diese Beziehung gilt streng genommen nur im Vakuum, praktisch aber auch in Luft.

Beispiel A

In einem geraden Leiter beträgt die Stromstärke 1 A. Wie groß sind magnetische Erregung und Flußdichte in 10 cm Entfernung vom Leiter (Abb. 46.1)?

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{1\ \mathrm{A}}{2\pi \cdot 0{,}1\ \mathrm{m}} = 1{,}59\ \mathrm{A/m}$$

$$B = \mu_0 H = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{Vs/Am} \cdot 1{,}59\ \mathrm{A/m} = 2 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{T}$$

Werden N Leiter jeweils vom Strom I durchflossen, dann ist die magnetische Erregung N-mal so groß.

$$H = \frac{I N}{l}$$

Der felderregende Strom durchsetzt ("durchflutet") die von einer Feldlinie eingeschlossene Fläche (Abb. 46.2). Man bezeichnet daher das Produkt $I\ N$ als Durchflutung Θ.

Durchflutung Θ

$\Theta = I N$ $\qquad [\Theta] = 1\ \mathrm{A}$

Über die Durchflutung wird elektrische Energie zugeführt, die sich über den Feldlinienweg verteilt. Eine bestimmte Durchflutung kann durch einen einzigen Leiter mit großer Stromstärke oder durch mehrere Leiter mit entsprechend kleiner Stromstärke erreicht werden (Abb. 46.3).

Durchflutungssatz

$I N = H l$

Der Durchflutungssatz stellt den Zusammenhang zwischen Erregerstrom und Magnetfeld her.

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Ringspule

Alle Feldlinien verlaufen innerhalb der Spule. Das Magnetfeld ist annähernd homogen (Abb. 46.4).

Magnetische Erregung H im Inneren einer Ringspule

$H = \frac{I N}{l} = \frac{I N}{2\pi r}$ $\qquad N$ ... Anzahl der Windungen

Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Zylinderspule

Im Spuleninneren existiert ein annähernd homogenes Magnetfeld mit der Erregung H. Die Erregung H_a außerhalb der Spule ist wesentlich kleiner. Wenn die magnetische Erregung entlang des Feldlinienweges nicht konstant ist, muß der Weg in einzelne Bereiche konstanter Erregung aufgeteilt werden. Die ge-

samte Durchflutung setzt sich dann aus den Durchflutungen der Teilbereiche zusammen.

Aus Abb. 47.1 und den Erläuterungen im Bilduntertitel folgt:

Magnetische Erregung (Feldstärke) im Inneren einer langen Zylinderspule

$$H = \frac{I\,N}{l}$$

Die Formel gilt allerdings nur für eine "lange" Spule. Das ist eine Spule, deren Durchmesser d klein ist gegenüber der Spulenlänge l. Die Erregung ist unabhängig von der Querschnittsfläche.

➤ Beispiel B

Eine Spule ist mit einem 1 mm dicken Draht einlagig auf ein Isolierrohr mit 30 mm Durchmesser gewickelt (Abb. 47.2). Die zulässige Stromstärke beträgt 6 A.

a) Welche magnetische Erregung läßt sich höchstens erzielen?

(1) $H = \frac{I\,N}{l}$ (2) $N = \frac{l}{d}$

(1), (2) $H = \frac{I\,l}{l\,d} = \frac{I}{d} = \frac{6\ \text{A}}{10^{-3}\ \text{m}} = 6000\ \text{A/m}$

b) Wie groß sind Flußdichte und magnetischer Fluß im Spuleninneren?

$$B = \mu_o\,H = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\,\frac{\text{V s}}{\text{A m}} \cdot 6000\,\frac{\text{A}}{\text{m}} = 7{,}54 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{V s}}{\text{m}^2}$$

$$\Phi = B\,A = 7{,}54 \cdot 10^{-3}\,\frac{\text{V s}}{\text{m}^2} \cdot \frac{(0{,}03\ \text{m})^2\,\pi}{4} = 5{,}3 \cdot 10^{-6}\ \text{V s}$$

Die magnetische Erregung ist umso größer, je mehr Amperewindungen je Längeneinheit untergebracht sind. Es muß Windung an Windung liegen.

Aufgaben

61. In welchem Abstand von einem mit 10 A durchflossenen Leiter ist die Flußdichte betragsgleich der Flußdichte des Erdmagnetfeldes ($B = 5 \cdot 10^{-5}$ T)?

62. Im Inneren einer Ringspule mit einem Außendurchmeser d_a = 15 cm und einem Innendurchmesser d_i = 11 cm soll der magnetische Fluß $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ Vs betragen. Wie viele Amperewindungen, damit ist das Produkt $I \cdot N$ gemeint, sind erforderlich?

63. Durch eine lange Zylinderspule, die mit einem 0,25 mm dicken Draht dreilagig gewickelt ist, fließt ein Strom von 0,4 A. Berechne die Flußdichte im Spuleninneren.

64. Zeichne ein B-H-Diagramm für $0 \leq H \leq 10\,000$ A/m.

65. Eine Zylinderspule mit einer Länge von 20 cm und einem Durchmesser von 5 cm hat 1200 Windungen. Wie groß ist die Flußdichte im Spuleninneren bei einer Stromstärke von 0,8 A?

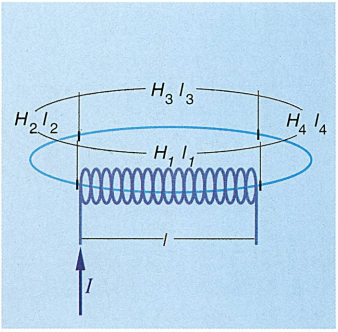
3.5 Magnetische Eigenschaften der Materie

Permeabilitätszahl

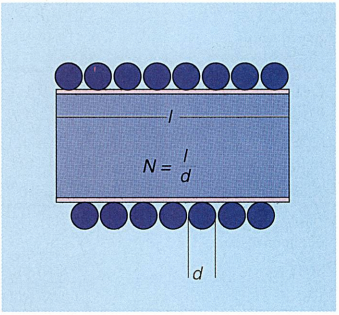
Im letzten Abschnitt wurde die Erregung magnetischer Felder mit Hilfe einer "Luftspule" behandelt. Dabei wurde betont, daß sich die wichtige Beziehung $B = \mu_o H$ exakt auf Vakuum bezieht, daß sie aber praktisch auch für Luft verwendet werden darf. Jetzt soll genauer untersucht werden, welche Auswirkungen sich ergeben, wenn das Innere einer felderregenden Spule mit Materie gefüllt wird.

Versuch

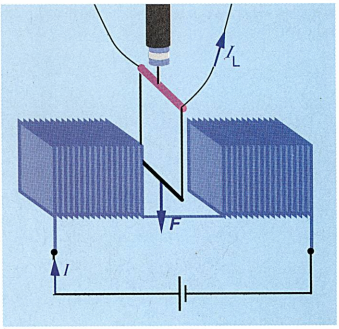
Zwischen zwei Spulen wird ein stromdurchflossenes Leiterstück an einem Kraftmesser aufgehängt (Abb. 47.3). Bei entsprechender Polung des Erreger-



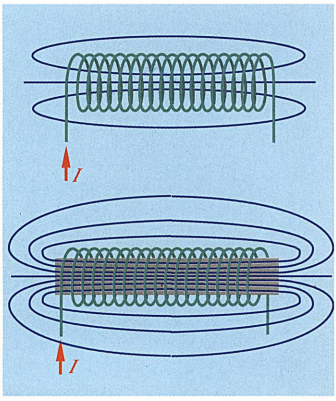
47.1 Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Zylinderspule:
$I\,N = H_1\,l_1 + H_2\,l_2 + H_3\,l_3 + \ldots$
Das Produkt $I\,N$ bezeichnet man als *Durchflutung*. In Analogie zum elektrischen Stromkreis bezeichnet man die Produkte $H_i\,l_i$ als magnetische Teilspannungen. Die Durchflutung der Spule ist gleich der Summe der magnetischen Teilspannungen entlang einer Feldlinie. Die magnetischen Teilspannungen außerhalb der Spule sind gegenüber jener innerhalb der Spule vernachlässigbar klein:
$I\,N = H_1\,l_1 = H\,l \quad \Rightarrow \quad H = \frac{I\,N}{l}$



47.2 Abbildung zu Beispiel B



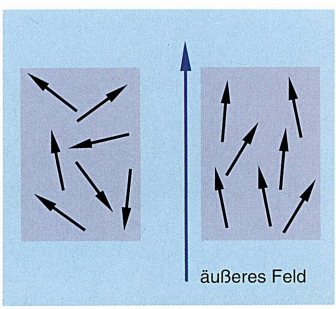
47.3 Die Kraftwirkung auf das Leiterstück hängt auch davon ab, welcher Stoff sich im Spuleninneren befindet.



48.1 *Oben:* Flußdichte B_o ohne Eisenkern, *unten:* Flußdichte B mit Eisenkern.

Ferromagnetische Stoffe $\mu_r >> 1$	
Stoff	μ_r
Gußeisen	500
Eisen (rein)	10 000
Permalloy (Ni/Mo)	70 000
Supermalloy (Ni/Fe/Mo/Mn)	300 000
Paramagnetische Stoffe μ_r minimal größer 1	
Stoff	μ_r
Luft	$1 + 0{,}4 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$1 + 22 \cdot 10^{-6}$
Diamagnetische Stoffe μ_r minimal kleiner 1	
Stoff	μ_r
Wasser	$1 - 7 \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$1 - 10 \cdot 10^{-6}$

48.2 Bezüglich ihrer Permeabilitätszahl μ_r unterscheiden wir zwischen ferro-, para- und diamagnetischen Stoffen.



48.3 Paramagnetismus: Durch ein äußeres Feld werden die Dipole ausgerichtet.

stromes I der Spulen und des Stromes I_L des Leiterstückes, wird dieses nach unten abgelenkt. Die wirkende Kraft kann am Kraftmesser abgelesen werden. Werden nun in das Innere der beiden Spulen Körper aus Holz, Glas, Aluminium . . . gebracht, dann ändert sich an der Kraftwirkung praktisch nichts. Werden jedoch Eisenkerne in das Spuleninnere eingeschoben, dann nimmt die Kraftwirkung stark zu. Die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter wird durch die Gleichung $F = B\, l\, I_L$ beschrieben. Da aber Leiterlänge l und Leiterstrom I_L gleich geblieben sind, muß sich durch das Einbringen des Eisenkernes die Flußdichte B vergrößert haben. Die Feldflußdichte B einer Spule mit Eisenkern ist wesentlich größer als die Feldflußdichte B_o einer Spule ohne Eisenkern (Abb. 48.1).

Permeabilitätszahl (relative Permeabilität) μ_r
Die Permeabilitätszahl μ_r ist das Verhältnis aus Flußdichte B in Materie zu Flußdichte B_o im Vakuum. Sie ist als Verhältniszahl eine unbenannte Größe, die charakteristisch für den jeweiligen Stoff ist.

$$\mu_r = \frac{B}{B_o}$$

$$B = \mu_r B_o \quad \text{und} \quad B_o = \mu_o H \;\Rightarrow\; B = \mu_r \mu_o H$$

Man kann sich diese Feldverstärkung durch eine Erhöhung der magnetischen Erregung durch den Eisenkern vorstellen. (Die Elementarmagnete des Eisenkerns werden durch das Magnetfeld der Spule "ausgerichtet". Der Eisenkern wird zum Stabmagneten, dessen Feld sich über jenes der Spule lagert.) Diese durch das Eisen zusätzlich verursachte Erregung nennt man *Magnetisierung M.*

$$B = \mu_o (H + M) = \mu_o (1 + \frac{M}{H}) H \;\Rightarrow\; \mu_r = 1 + \frac{M}{H}$$

Alle Stoffe lassen sich bezüglich der Permeabilitätszahl μ_r in drei Gruppen einteilen (Tab. 48.2).

Die Permeabilitätszahlen für *diamagnetische* und *paramagnetische* Stoffe sind praktisch gleich 1. Die geringen (negativen oder positiven) Abweichungen von 1 lassen sich nur mit empfindlichen Meßgeräten nachweisen. Eisen, Kobald, Nickel, Gadolinium und verschiedene Legierungen besitzen sehr große Permeabilitätszahlen und werden als *ferromagnetisch* bezeichnet.

Die Magnetisierung der Materie in einem magnetischen Feld wird durch die Bewegung der Elektronen in den Atomen verursacht. Ein um den Atomkern kreisendes Elektron ist ein Kreisstrom und damit ein atomarer magnetischer Dipol (Bahnmagnetismus). Aber auch der Drehung des Elektrons um die eigene Achse (Spinbewegung) ist ein magnetischer Dipol zuzuordnen (Spinmagnetismus). Das Verhalten der Materie im Magnetfeld wird durch diese atomaren Dipole bestimmt.

Diamagnetismus

Bei einem diamagnetischen Stoff heben sich alle atomaren magnetischen Dipole in ihrer Wirkung auf. Wird nun eine solche Substanz in ein Magnetfeld gebracht, dann werden magnetische Dipole induziert, die dem äußeren Magnetfeld entgegenwirken. In diamagnetischen Stoffen tritt daher eine – wenn auch sehr geringe – Schwächung des äußeren Feldes auf (μ_r ist minimal kleiner als 1).

In allen Stoffen werden im Magnetfeld Dipole induziert. Diamagnetismus tritt aber nur in Erscheinung, wenn er nicht durch den Paramagnetismus oder Ferromagnetismus überdeckt wird.

Paramagnetismus

In paramagnetischen Substanzen heben sich die atomaren magnetischen Dipole in ihrer Wirkung nicht auf. Die Atome besitzen einen resultierenden magne-

tischen Dipol. Diese Dipole sind jedoch infolge der Wärmebewegung völlig ungeordnet.
Durch ein äußeres Magnetfeld werden die Dipole ausgerichtet. Dieser Wirkung des Feldes ist jedoch die Wärmebewegung entgegengerichtet. Es tritt eine – wenn auch geringe – Verstärkung des äußeren Magnetfeldes auf (μ_r ist minimal größer als 1). Ein paramagnetischer Stoff besitzt permanente magnetische Dipole, die in einem Magnetfeld ausgerichtet werden.
Dia- und paramagnetische Stoffe zeigen ohne äußeres Magnetfeld keine magnetischen Erscheinungen.

Ferromagnetismus

In ferromagnetischen Stoffen gibt es kleine Bereiche, die *Weißschen Bezirke*, in denen die magnetischen Dipole infolge ihrer Wechselwirkung bereits parallel und gleichsinnig gerichtet sind (Abb. 49.1 links). Allerdings sind die Weißschen Bezirke untereinander völlig ungeordnet, sodaß der Stoff nach außen hin unmagnetisch ist. Unter der Einwirkung eines äußeren Feldes werden Bezirke, die schon ganz oder teilweise zum äußeren Feld ausgerichtet sind, auf Kosten ungünstig orientierter Bezirke anwachsen (Abb. 49.1 Mitte). Weiters können die Dipole eines ganzen Bezirkes durch Umklappen eine günstigere Orientierung zum äußeren Feld einnehmen (*Barkhausensprünge*, Abb.49.2).

Schließlich werden bei weiterer Vergrößerung der magnetischen Erregung Bezirke, die noch nicht nach dem äußeren Feld ausgerichtet sind, in Feldrichtung gedreht (Abb. 49.1 rechts). Die Ausrichtung nennt man Magnetisierung. Der ferromagnetische Ordnungszustand wird durch die Wärmebewegung gestört. Daher verschwindet der Ferromagnetismus bei einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur (Tab. 49.3).

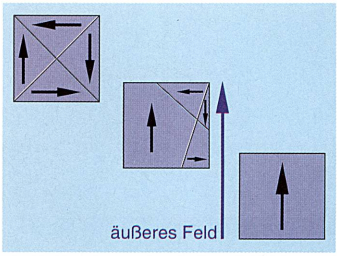
Die Permeabilität ist ein Maß für die magnetische "Durchlässigkeit" oder das magnetische "Leitvermögen" eines Stoffes. Eisen besitzt ein wesentlich besseres magnetisches Leitvermögen als Luft. Die Feldlinien werden in das Eisen "hineingezogen". Eine Abschirmung gegen magnetische Felder kann daher durch ferromagnetische Stoffe erfolgen. Die Abschirmung ist dabei umso besser, je größer der μ_r-Wert des Materials ist. Im Inneren eines Eisenringes ist ein nahezu feldfreier Raum. Im Gegensatz zu elektrostatischen Feldern ist eine vollständige Abschirmung gegen magnetostatische Felder nicht möglich.

Magnetisierungskurve

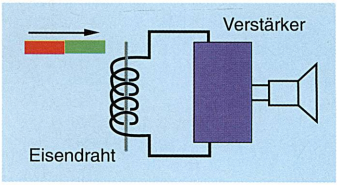
Trägt man die magnetische Flußdichte B in Abhängigkeit von der magnetischen Erregung H auf, dann erhält man die *Magnetisierungskurve*. Die Steigerung der magnetischen Erregung H wird durch Erhöhung der Erregerstromstärke I der Feldspule erzielt.

Abb. 49.4 zeigt den Vergleich einer "Eisenkernspule" mit einer "Luftspule". Dabei kann man die typischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Stoffes erkennen. In der Luftspule steigt die Flußdichte B linear mit der Erregung H nach der Beziehung $B = \mu_o H$ an. In der Eisenkernspule steigt die Flußdichte B wesentlich stärker an, weil es durch die Magnetisierung im Eisen zu einer Verstärkung kommt. Der Zusammenhang zwischen B und H läßt sich nicht mehr durch eine Gerade darstellen, er ist *nichtlinear*. In der Beziehung $B = \mu_r \mu_o H$ ist μ_r keine Konstante, sondern selbst von der magnetischen Erregung abhängig (Abb. 49.5).

Bei der Aufnahme der Magnetisierungskurve befindet sich zu Beginn ein unmagnetischer Eisenkern in der Spule. Mit wachsender magnetischer Erregung H (wachsender Erregerstromstärke I) erhöht sich die Flußdichte B zunächst stark. Das heißt, es werden sehr viele Weißsche Bezirke ausgerichtet. Im weiteren wird die Kurve flacher, da schon die meisten Weißschen Bezirke ausgerichtet sind. Sind schließlich alle Bezirke ausgerichtet, so ist der Eisenkern vollständig magnetisiert, man spricht von Sättigung. Wird die magnetische Erregung weiter erhöht, dann steigt die Flußdichte wie bei einer Luftspule nach der Beziehung $B = \mu_o H$ an.



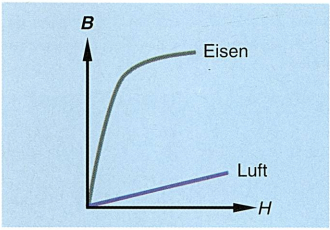
49.1 Jene Weißschen Bezirke, deren magnetische Dipole mit der Richtung des äußeren Feldes übereinstimmen, wachsen an.



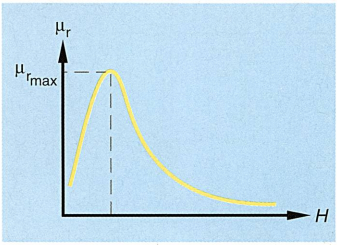
49.2 Die Barkhausensprünge können auch hörbar gemacht werden. Ein Eisendraht wird magnetisiert, indem man ihm einen Dauermagneten nähert. Dabei nimmt die Flußdichte sprunghaft zu. Die dadurch in der Spule induzierte Spannung (siehe Seite 57 ff) bewirkt im Lautsprecher ein knackendes Geräusch.

Stoff	Curie-Temperatur in K
Eisen	1042
Nickel	631
Kobalt	1400

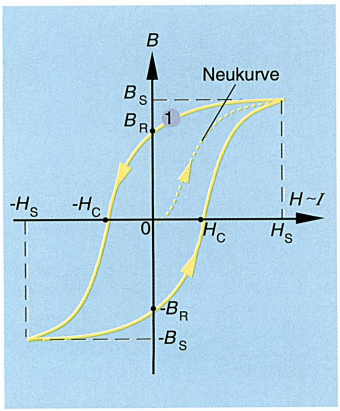
49.3 Bei dieser Temperatur verschwindet der Ferromagnetismus.



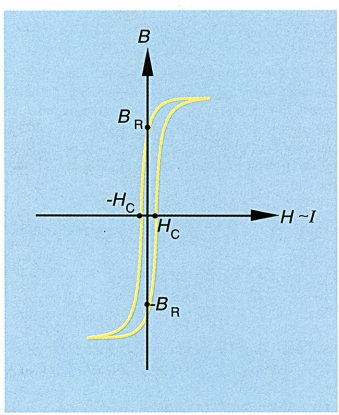
49.4 Magnetisierungskurven



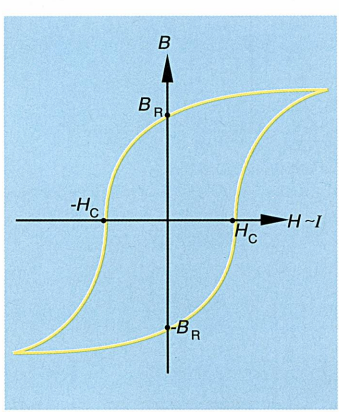
49.5 μ_r-H-Diagramm



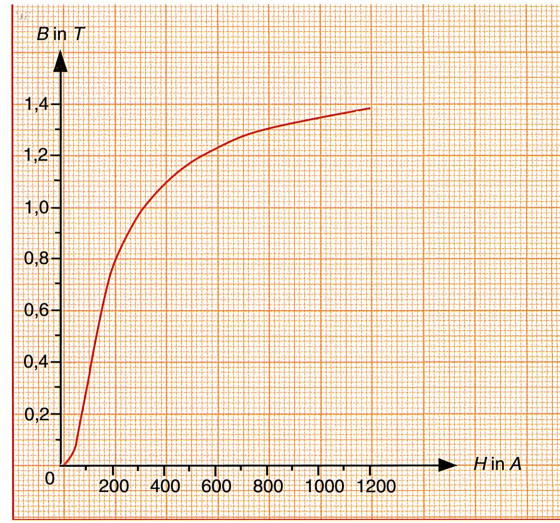
50.1 Hystereseschleife



50.2 Hystereseschleife eines weichmagnetischen Stoffes



50.3 Hystereseschleife eines hartmagnetischen Stoffes



50.4 Magnetisierungskurve von Stahlguß und Dynamoblech

➤ **Beispiel A**

a) Wie groß ist die magnetische Flußdichte B in einem geschlossenen Stahlgußkern bei einer magnetischen Erregung H von 300 A/m? Wie groß ist die Permeabilitätszahl μ_r in diesem Fall?

Abb. 50.4 entnimmt man, daß $B = 0{,}98$ T, wenn $H = 300$ A/m.

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{0{,}98\ \text{T}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 300\ \text{A/m}} = 2600$$

b) Wie ändern sich diese Werte, wenn die magnetische Erregung verdoppelt wird?

Für $H = 600$ A/m erhält man $B = 1{,}23$ T.

$$\mu_r = \frac{1{,}23\ \text{T}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 600\ \text{A/m}} = 1632$$

Eine Verdopplung der magnetischen Erregung ergibt keine Verdopplung der Flußdichte und der Permeabilitätszahl. Das zeigt deutlich den nichtlinearen Zusammenhang zwischen B und H.

Hystereseschleife (Abb. 50.1)

Wird ein anfangs unmagnetisches Material in einer Spule durch Steigerung der magnetischen Erregung H (Erregerstromstärke I) von $H = 0$ auf H_S magnetisiert, so stellt sich die Sättigungsflußdichte B_S ein. Dabei wird die Magnetisierungskurve durchlaufen. Man bezeichnet diese auch als *Neukurve*. Verringert man nun die magnetische Erregung H (Erregerstromstärke I) auf Null, dann wird nicht mehr die Neukurve, sondern der Kurvenzweig (1) durchlaufen. Die Flußdichte geht nicht mehr auf Null zurück, es bleibt eine *Restflußdichte* B_R *(Remanenz)*. Zur Aufhebung dieser verbliebenen Magnetisierung ist eine Gegenerregung (*Koerzitiverregung*) H_C erforderlich. Die magnetische Gegenerregung erhält man durch Umpolen des Erregerstromes I. Wird nun die Gegenerregung weiter erhöht, so stellt sich eine *Sättigungsflußdichte* (B_S) mit entgegengerichteter Magnetisierung ein. Wird die magnetische Erregung anschließend auf Null verringert, bleibt wieder eine Restflußdichte (B_R), aber mit entgegengesetztem Vorzeichen. Diese Magnetisierung kann wieder durch eine

geeignete Koerzitiverregung H_C beseitigt werden. Bei weiterer Erhöhung auf H_S stellt sich wieder die Sättigungsflußdichte B_S ein. Dieses Verhalten eines ferromagnetischen Stoffes nennt man Hystereseverhalten. Die durchlaufene, geschlossene Kurve heißt *Hystereseschleife*. Die von der Hystereseschleife eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die Ummagnetisierungsarbeit. Man nennt sie auch Hystereseverluste. Sie führen zu einer Erwärmung des Materials.

Ferromagnetische Werkstoffe

Ferromagnetische Stoffe lassen sich grob in *weichmagnetische* und *hartmagnetische Stoffe* einteilen.

Weichmagnetische Stoffe besitzen eine geringe Koerzitiverregung und eine schmale Hystereseschleife (Abb. 50.2). Daher sind die Hystereseverluste gering. Weichmagnetische Stoffe werden dort eingesetzt, wo eine ständige Ummagnetisierung durch Wechselfelder erfolgt (Transformator, Motor, Generator).

Hartmagnetische Stoffe besitzen eine große Remanenz und Koerzitiverregung und damit eine breite Hystereseschleife (Abb. 50.3). Sie werden als Dauermagnete verwendet. Eine große Koerzitiverregung ist erforderlich, um eine Entmagnetisierung durch äußere Felder zu verhindern. Anwendungen: Haftmagnete, Lautsprecher, kleine Motoren und Generatoren (z. B. Fahrraddynamo), Drehspulinstrument, Kupplungen, Spannfutter, ...

Ferrimagnetismus

Neben den ferromagnetischen Stoffen spielen auch *ferrimagnetische Stoffe* – sogenannte Ferrite – eine große Rolle für die technische Anwendung. Sie besitzen eine geringere Sättigungsmagnetisierung als ferromagnetische Stoffe. Wegen ihres hohen elektrischen Widerstandes sind die Wirbelstromverluste gering. Sie werden als weich- und hartmagnetische Stoffe hergestellt.

Magnetostriktion

Ferromagnetische Stoffe ändern ihre äußeren Abmessungen bei einer Magnetisierung. Die relative Längenänderung $\Delta l / l$ beträgt bei der Sättigungsmagnetisierung 10^{-6} bis 10^{-5}. In einem magnetischen Wechselfeld kommt es zu periodischen Längenänderungen. Diese können zur Erzeugung von Ultraschall benützt werden.

Supraleitung

Supraleiter verlieren bei Abkühlung unter die für das Material charakteristische *Sprungtemperatur* T_c abrupt ihren elektrischen Widerstand. Ein magnetisches Feld wird aus dem Supraleiter hinausgedrängt (Abb. 51.1).

Zur Erzeugung starker Magnetfelder (großer Flußdichten) benötigt man hohe Stromstärken. Diese führen aber zu beträchtlichen Wärmeverlusten. Starke Magnetfelder – etwa für die Kernspintomographie in der Medizin oder für Teilchenbeschleuniger – werden daher mit supraleitenden Spulen gebaut.

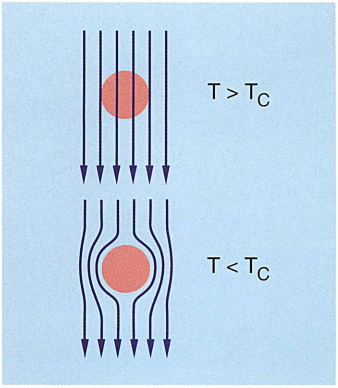
Aufgaben

65. Welche magnetische Erregung ist erforderlich, um in einem geschlossenen Stahlgußkern eine Flußdichte von 0,8 T zu erzeugen?

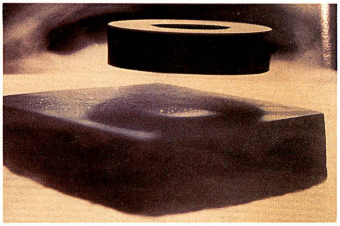
66. In einer Luftspule und in einer Eisenkernspule wird die magnetische Erregung verdoppelt. Verdoppelt sich dabei auch die Flußdichte?

67. Zeige, daß das Produkt $B\,H$ eine Energiedichte darstellt. (Die Einheit der Energiedichte ist 1 J/m^3.)

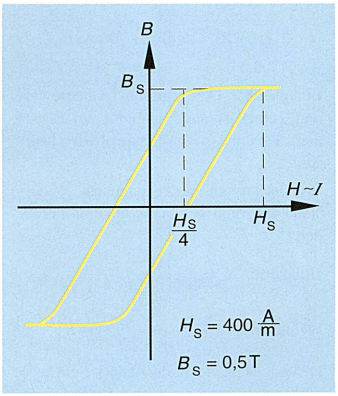
68. Die Hystereseschleife für eine bestimmte Eisensorte ist annähernd ein Parallelogramm (Abb. 51.3). Wie groß sind die Hystereseverluste für 1 dm^3 dieser Eisensorte? Wie groß ist die Verlustleistung, wenn die Schleife 50mal in 1 s durchlaufen wird?



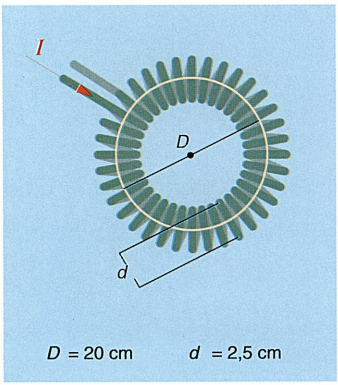
51.1 Supraleiter verlieren unterhalb der Sprungtemperatur T_c abrupt ihren elektrischen Widerstand.



51.2 Ein Versuch zum Nachweis der Supraleitung: Ein $YBa_2Cu_3O_7$-Supraleiter mit einer Sprungtemperatur von 93 K wird in flüssigem Stickstoff abgekühlt und über der Magnetanordnung positioniert. Der Supraleiter wird abgestoßen und schwebt. Steigt die Temperatur des Supraleiters über die Sprungtemperatur, fällt er auf die Magnetanordnung. Erklärung: Die beiden deutschen Physiker *W. Meißner* und *R. Ochsenfeld* konnten zeigen, daß sich das magnetische Verhalten eines Supraleiters unterhalb der Sprungtemperatur verändert. Das Magnetfeld wird aus dem Supraleiter gedrängt. Man sagt, der Supraleiter verhält sich *diamagnetisch*. Folge: Er schwebt über dem Magneten.



51.3 Abbildung zu Aufgabe 68



52.1 Abbildung zu Beispiel A

3.6 Magnetischer Kreis

Magnetische Feldlinien sind geschlossene Linien. Dieser geschlossene Weg wird – in Analogie zum elektrischen Stromkreis – als *magnetischer Kreis* bezeichnet.

Das Ohmsche Gesetz des magnetischen Kreises

➤ **Beispiel A:** *Der magnetische Kreis einer Luftspule*

Eine Ringspule mit 1000 Windungen ist auf einen Holzkern aufgewickelt (Abb. 52.1). Die Stromstärke beträgt 0,5 A. Wie groß ist die Flußdichte im Inneren der Spule (im Holzkern)?

Für Holz ist $\mu_r = 1$, daher verhält sich die Spule wie eine Luftspule:

(1) $B = \mu_o H$ (2) $H = \frac{I N}{l}$ (3) $l = D \pi$

(1), (2), (3) $B = \mu_o \frac{I N}{D \pi} = 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot \frac{0{,}5\ \text{A} \cdot 1000}{0{,}2\ \text{m} \cdot \pi} = 0{,}001\ \text{T}$

Verallgemeinerung von Beispiel A:

(1) $I N = H l$ (2) $B = \mu_r \mu_o H$ (3) $B = \frac{\Phi}{A}$

(2), (3) $H = \frac{\Phi}{\mu_r \mu_o A}$

(1), (2), (3) $I N = \frac{l}{\mu_r \mu_o A} \Phi$ Vereinbarung: $R_m = \frac{l}{\mu_r \mu_o A}$

Ohmsches Gesetz des magnetischen Kreises
$I N = R_m \Phi$ R_m ... magnetischer Widerstand des Kreises

In der Praxis kommt es oft vor, daß der Eisenkern nicht geschlossen ist, sondern einen Luftspalt enthält. Es besteht nun die Aufgabe, die notwendige Durchflutung für eine gewünschte Flußdichte im Luftspalt zu ermitteln.

➤ **Beispiel B:** *Der magnetische Kreis einer Spule mit Eisenkern*

Die Spule aus dem Beispiel A erhält einen Stahlgußkern.
a) Wie groß ist die Flußdichte im Kern? Wie groß ist die Permeabilitätszahl μ_r?

$H = I \cdot \frac{N}{l} = \frac{500}{0{,}2 \cdot \pi}\ \text{A/m} = 796\ \text{A/m}$

Der Magnetisierungskurve kann man für $H = 796$ A/m entnehmen: $B \approx 1{,}3$ T.

$\mu_r = \frac{B}{\mu_o H} =$

$= \frac{1{,}3\ \text{T}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 796\ \text{A/m}} =$

$= 1300$

Bei gleicher Durchflutung (Amperewindungszahl) ist die Flußdichte im Eisenkern 1300mal so groß wie in der Luftspule.

b) Wie hat sich der magnetische Widerstand aufgrund des Stahlgußkerns verändert?

Holzkern: $R_m = \frac{l}{\mu_o A}$

Stahlgußkern: $R^*_m = \frac{l}{\mu_r \mu_o A} = \frac{1}{\mu_r} R_m$

Der magnetische Widerstand ist um $\mu_r = 1300$ gesunken.

➤ **Beispiel C:** *Spule mit Eisenkern und Luftspalt*

Der Stahlgußkern aus dem Beispiel B erhält einen 1 mm breiten Luftspalt.
a) Auf welchen Wert sinkt die Flußdichte ab?

Der Feldlinienweg setzt sich aus dem Eisenweg und dem Luftweg zusammen. Der Eisenweg erfodert die Durchflutung $H\ l_E$ und der Luftweg die Durchflutung $H_L\ l_L$.
Die Gesamtdurchflutung ist gleich der Summe der Durchflutungen für die Teilwege:

$I N = H\, l_E + H_L\, l_L = H\, l_E + \frac{B}{\mu_o} l_L \quad \Leftrightarrow \ \ldots \ \Leftrightarrow \quad B = \frac{I N}{l_L} \mu_o - \frac{l_E}{l_L} \mu_o H$

Dies stellt die Gleichung einer Geraden dar. Allerdings ist noch der Zusammenhang zwischen B und H durch die Magnetisierungskurve zu berücksichtigen. Eine Lösung ist daher nur näherungsweise möglich. Die graphische Lösung erhält man als Schnittpunkt dieser Geraden mit der Magnetisierungskurve.

$H = 0$ ergibt den Schnittpunkt der Geraden mit der B-Achse :

$B = \frac{I N}{l_L} \mu_o = \frac{500\ \text{A}}{0{,}001\ \text{m}} \cdot 1{,}256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 0{,}628\ \text{T}$

Das ist auch die Flußdichte unter Vernachlässigung des Eisenweges.

$B = 0$ ergibt den Schnittpunkt der Geraden mit der H-Achse:

$$\frac{I\,N}{l_L}\,\mu_o = \frac{l_E}{l_L}\,\mu_o H \;\Leftrightarrow\; H = \frac{I\,N}{l_E}$$

$$H = \frac{500\ \text{A}}{0{,}627\ \text{m}} = 797{,}5\ \text{A/m}$$

Die Flußdichte sinkt auf $B = 0{,}48$ T ab (Abb. 53.1 unten).

b) Welche Amperewindungszahl ist erforderlich, um im Luftspalt und im Eisenkern wieder eine Flußdichte von 1,3 T zu erreichen?

Der Magnetisierungskurve entnimmt man, daß die Feldflußdichte B rund 1,3 T beträgt, wenn $H = 796$ A/m.
Die magnetische Erregung H_L für den Luftspalt beträgt:

$$H_L = \frac{B}{\mu_o} = \frac{1{,}3\ \text{T}}{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am}} = 1{,}03 \cdot 10^6\ \text{A/m}$$

Die gesamte Durchflutung setzt sich aus dem Eisen- und Luftanteil zusammen:

$$I\,N = H\,l_E + H_L\,l_L$$

$$I\,N = 796\ \text{A/m} \cdot 0{,}627\ \text{m} + 1{,}03 \cdot 10^6\ \text{A/m} \cdot 0{,}001\ \text{m}$$

$$I\,N = \underbrace{499\ \text{A}}_{\text{Eisenanteil}} + \underbrace{1030\ \text{A}}_{\text{Luftanteil}}$$

$I\,N = 1529$ A (Amperewindungen)

Für den 1 mm breiten Luftspalt wird eine ca. doppelt so große Durchflutung wie für den 627 mm langen Eisenweg benötigt.

c) R_{m_E} ist der magnetische Widerstand für den Eisen-, R_{m_L} jener für den Luftweg. In welcher Beziehung stehen diese beiden Größen zum Gesamtwiderstand R_m des zusammengesetzten Kreises?

(1) $I\,N = H\,l_E + H_L\,l_L$ (2) $H = \frac{B}{\mu_r\,\mu_o}$ (3) $H_L = \frac{B}{\mu_o}$ (4) $B = \frac{\Phi}{A}$

(1), (2), (3), (4) $I\,N = \left(\frac{l_E}{\mu_r\,\mu_o\,A} + \frac{l_L}{\mu_o\,A}\right)\Phi$

Mit $R_{m_E} = \frac{l_E}{\mu_r\,\mu_o\,A}$ und $R_{m_L} = \frac{l_L}{\mu_o\,A}$ erhält man:

$$I\,N = (R_{m_E} + R_{m_L})\,\Phi \;\Rightarrow\; R_m = R_{m_E} + R_{m_L}$$

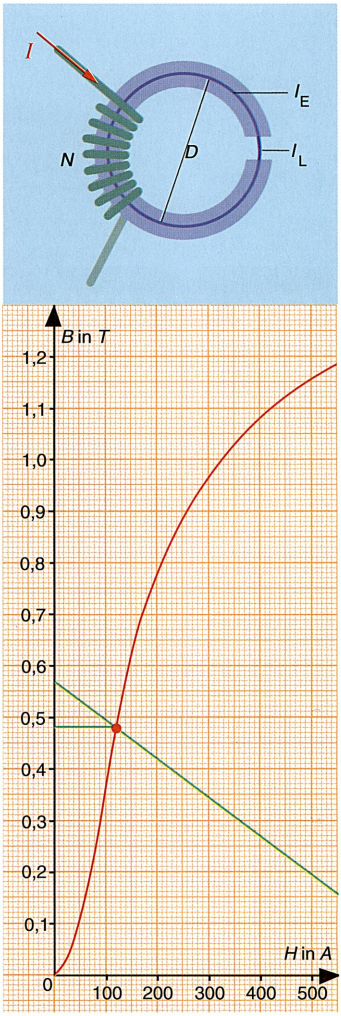
Der gesamte magnetische Widerstand Rm ist die Summe der Einzelwiderstände.

d) In welcher Größenbeziehung stehen R_{m_E} und R_{m_L}?

$$R_{m_E} = \frac{l_E}{\mu_r\,\mu_o\,A} = \cdots = 7{,}82 \cdot 10^5\ \text{A/Vs}$$

$$R_{m_L} = \frac{l_L}{\mu_o\,A} = \cdots = 1{,}62 \cdot 10^6\ \text{A/Vs}$$

Der 1 mm breite Luftspalt besitzt einen ca. doppelt so großen magnetischen Widerstand wie der 627 mm lange Eisenweg.



53.1 Abbildung zu Beispiel C. *Oben:* Spule mit Eisenkern und Luftspalt. *Unten:* Graphische Ermittlung der Flußdichte B (vgl. Abb. 50.4)

Zusammenfassung der Ergebnisse der Beispiele A, B und C:

500 Amperewindungen ergeben im Inneren der Luftspule eine Flußdichte von 0,001 T und in einem Stahlgußkern 1,3 T.

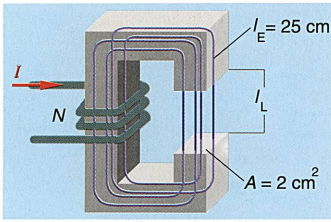
Erhält der Stahlgußkern einen 1 mm breiten Luftspalt, dann sinkt die Flußdichte auf 0,48 T ab.

Um nun wieder eine Flußdichte von 1,3 T zu erreichen, sind 1529 Amperewindungen notwendig.

Aufgaben

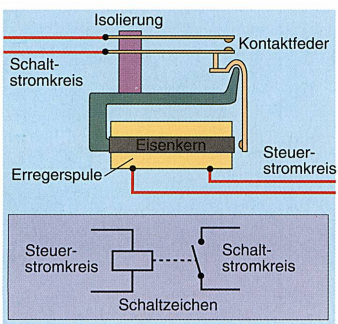
6. Eine Spule ist auf einen Stahlgußkern (mittlerer Duchmesser = 25 cm, Durchmesser des Kernquerschnittes = 30 mm) gewickelt. Der magnetische Fluß im Kern soll $4 \cdot 10^{-4}$ Wb betragen. Wie viele Windungen sind erforderlich, wenn der Spulenstrom 0,5 A betragen soll?

7. Die Erregerwicklungen zweier Ringspulen mit den verschiedenen Durchmessern D_1 und D_2 ($D_1 > D_2$) besitzen gleich viele Amperewindungen. Die beiden Eisenkerne sind aus dem gleichen Material und haben gleich große Querschnittsflächen. a) In welchem Kern ist die Flußdichte größer? b) In welchem Verhältnis stehen die beiden Flußdichten?

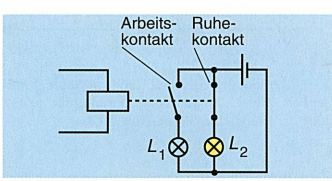


54.1 Abbildung zu Aufgabe 71 und 72

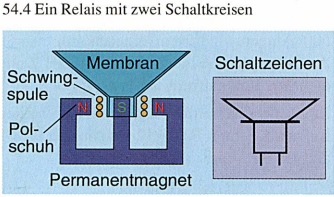
54.2 Ein Topfmagnet auf einem Schrottlagerplatz



54.3 *Oben:* Schematische Darstellung eines Relais, *unten:* Schaltbild eines Relais



54.4 Ein Relais mit zwei Schaltkreisen



54.5 Lautsprecher: Schemabild (links) und Schaltzeichen (rechts)

3.7 Anwendungen

Lasthebemagnet

Eine Spule mit Weicheisenkern wird als *Elektromagnet* bezeichnet. Dieser zieht – genauso wie ein Permanentmagnet – ferromagnetische Körper an. Die Tragkraft eines Magneten ist proportional zu B^2. Hebemagnete werden oft als Topfmagnete gebaut (Abb. 54.2).

Relais

Eine weitere wichtige Anwendung des Elektromagneten ist das *Relais* (Abb. 54.3). Der Eisenweg des magnetischen Kreises ist durch den Luftspalt zwischen Eisenkern und Anker unterbrochen. Fließt Strom durch die Erregerspule, dann wird der Anker angezogen und stellt den Kontakt zwischen Kontaktfedern her oder öffnet einen Kontakt.

Ein Relais besitzt im allgemeinen mehrere Kontaktfedern, sodaß auch mehrere Schaltkreise geschaltet werden können. Neben dem Arbeitskontakt, der beim Einschalten geschlossen wird, gibt es auch einen Ruhekontakt, der beim Einschalten geöffnet wird (Abb. 54.4). Solange der Steuerstromkreis offen ist, leuchtet die Lampe L_1. Nach dem Schließen des Steuerstromkreises erlischt die Lampe L_1, und die Lampe L_2 beginnt zu leuchten. Schaltstromkreis und Steuerstromkreis sind voneinander getrennt. Mit Hilfe eines schwachen Stromes (einer kleinen Spannung) kann ein starker Strom (eine große Spannung) geschaltet werden. Das bringt eine erhöhte Sicherheit für den Menschen. Bei einer Fernschaltung von Maschinen entfällt der Leistungsverlust entlang der Leitungen.

Lautsprecher

Eine zylindrische Schwingspule befindet sich im Luftspalt zwischen Dauermagnet und Polschuhen (Abb. 54.5). Fließt Strom durch die Spule, dann wird diese mit der Membran nach links oder rechts bewegt. Wird eine Tonfrequenzspannung an die Spulenanschlüsse gelegt, dann schwingt die Membran im Rhythmus dieser Tonfrequenz und erregt in der Luft Schallwellen.

Drehspulinstrument

Im Luftspalt zwischen den Polschuhen eines Dauermagneten und dem feststehenden Weicheisenkern ist ein starkes, radiales Magnetfeld vorhanden, das überall die gleiche Flußdichte besitzt. In diesem Luftspalt befindet sich eine drehbar gelagerte Spule, die *Drehspule*. Die Stromzuführung erfolgt über die Rückstellfedern (Abb. 55.1 und 55.5).

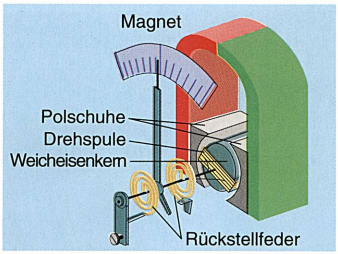
Fließt kein Strom durch die Spule, wird diese durch die Rückstellfedern in der Nullage gehalten. Auf die beiden zu den Feldlinien normal stehenden Teile der stromdurchflossenen Spule wirkt jeweils die Kraft $F = B\,l\,N\,I$. Diese beiden Kräfte im Abstand d bilden ein Kräftepaar und damit ein Drehmoment $M = F\,d$. Die Spule wird sich so weit verdrehen, bis das Rückstellmoment $M_R = k^* \varphi$ durch die Federn gleich dem auslenkenden Moment ist.

$$B\,l\,INd = k^* \varphi \quad \Rightarrow \quad \varphi \sim I$$

Die Gleichgewichtsbedingung zeigt, daß der Winkelausschlag (die Verdrehung φ) proportional zur Stromstärke I in der Drehspule ist.

Daher ist die Skalenteilung linear. Der Ausschlag (die Drehrichtung der Spule) hängt von der Stromrichtung ab. Deshalb ist das Meßwerk nur für Gleichstrom geeignet. Eine besonders reibungsarme, daher empfindliche Anordnung erhält man durch eine Spannbandaufhängung der Spule und durch Verwendung eines Lichtzeigers. Mit einem derartigen *Galvanometer* können Ströme bis zu 10^{-9} A gemessen werden. Die Drehspule besitzt einen Widerstand, den sogenannten Innenwiderstand des Meßwerkes. Legt man eine Spannung an die Drehspule, dann ist die Stromstärke proportional zu dieser Spannung. Das Drehspulmeßwerk ist als Strommesser (Amperemeter) und als Spannungsmes-

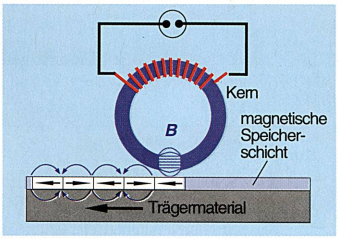
ser (Voltmeter) für Gleichströme geeignet. Unter Verwendung eines Gleichrichters können auch Wechselströme gemessen werden. In der Praxis werden oft Meßgeräte mit umschaltbaren Meßbereichen, sogenannte Vielfachmeßinstrumente, verwendet. Eine Meßbereichserweiterung erfolgt mit Hilfe von Parallel- und Vorwiderständen (siehe Abschnitt 2.9).



55.1 Drehspulmeßinstrument

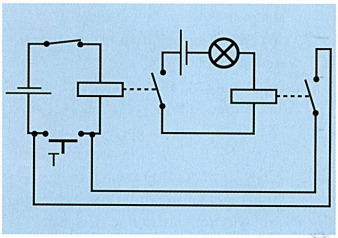
Magnetspeicher

In der *elektronischen Datenverarbeitung* werden alle Daten in *binärer* Form, also mit Hilfe von zwei "Zuständen" gespeichert. Im PC-Bereich sind derzeit Diskette und Festplatte von großer Bedeutung. Es sind dies rotierende, flexible bzw. feste Platten, die aus dem Trägermaterial und einer dünnen magnetisierbaren Speicherschicht bestehen. Beim "Schreiben" der Daten erzeugt der Strom in der Spule des Schreib-Lesekopfes einen magnetischen Fluß in Kern und Luftspalt (Abb. 55.2). Der Magnetfluß im Luftspalt magnetisiert die Speicherschicht, die sich am Spalt vorbeibewegt. Durch die Änderung der Stromrichtung wird auch die Flußrichtung und damit die Magnetisierungsrichtung geändert. Auf diese Weise kann in der Speicherschicht ein binäres Muster erzeugt werden. Diese magnetisierten Bereiche besitzen in ihrer unmittelbaren Umgebung ein lokales Magnetfeld. Beim "Lesen" der Daten wird die Speicherschicht wieder am Schreib-Lesekopf vorbeigeführt. Wenn die Übergangszone zweier entgegengesetzt magnetisierter Bereiche den Luftspalt des Schreib-Lesekopfes passiert, wird durch die Flußänderung in der Spule eine Spannung induziert. Die Speicherschicht enthält nadelförmige Teilchen aus Eisenoxid, Chromoxid oder auch reinem Eisen, die in ein Bindemittel eingebettet sind.



55.2 Magnetisierung einer Speicherschicht

Bei der *Tonaufzeichnung* wird die magnetische Schicht des Tonbandes durch den Tonkopf im Rhythmus der Tonfrequenz magnetisiert. Zur Verminderung von Verzerrungen wird mit einem Hochfrequenzstrom vormagnetisiert.



55.3 Abbildung zu Aufgabe 76

Aufgaben

71. Im 2 mm breiten Luftspalt des Stahlgußkernes soll eine Flußdichte von 0,8 T herrschen. Wie viele Amperewindungen sind erforderlich (Abb. 54.1)?

72. Im 5 mm breiten Luftspalt des Stahlgußkernes soll eine Flußdichte von 0,8 T herrschen (Abb. 54.1). a) Berechne den magnetischen Widerstand des Eisen- und Luftweges. b) Berechne die erforderliche Amperewindungszahl unter Vernachlässigung des Eisenweges.

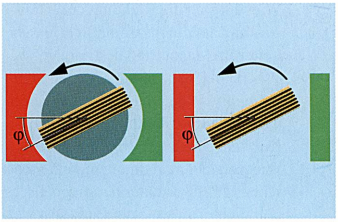
73. In einem geschlossenen Eisenkern (l_E = 20 cm) ist eine Flußdichte von 0,92 T vorhanden. Auf welchen Wert sinkt die Flußdichte ungefähr ab, wenn ein Luftspalt von 1 cm eigebaut wird? (Der Eisenweg soll vernachlässigt werden.)

74. Wie und warum ändert sich die Tragkraft eines Elektromagneten, wenn der Luftspalt zwischen Magnetkern und Last zunimmt?

75. Warum ist die Tragkraft eines Elektromagneten unabhängig von der Stromrichtung in den Erregerspulen?

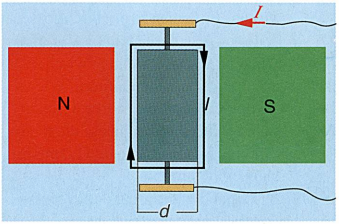
76. Was bewirkt ein kurzzeitiges Drücken der Taste T (Abb. 55.3)?

77. Eine Drehspule befindet sich wie beim Drehspulmeßgerät in einem radialhomogenen Feld (Abb. 55.4 links). Eine andere befindet sich in einem homogenen Feld gleicher Flußdichte (Abb. 55.4 rechts). Zeichne die Kräfte für eine angenommene Drehrichtung ein. Wodurch unterscheiden sich die Drehmomente in beiden Fällen? Skizziere den Verlauf der Drehmomente in Abhängigkeit vom Drehwinkel zwischen 0° und 60°. Warum besitzt das Drehspulmeßwerk ein radialhomogenes Magnetfeld?



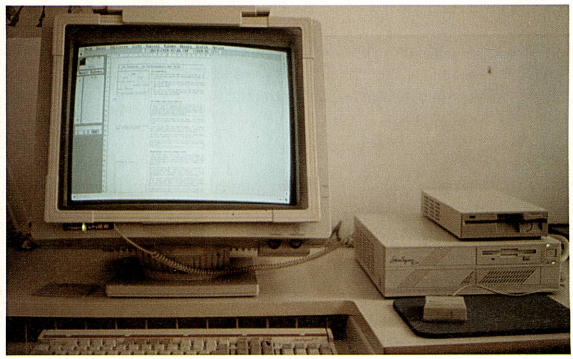
55.4 Abbildung zu Aufgabe 77

78. Im Luftspalt eines Drehspulmeßwerkes beträgt die Flußdichte 0,5 T. Durch die Drehspule (l = 2 cm, d = 2 cm, N = 100) fließen 20 mA. Wie groß ist der Winkelausschlag φ, wenn die Winkelrichtgröße der Rückstellfedern $k^* = 2 \cdot 10^{-5}$ Nm/Grad beträgt (Abb. 55.5)?



55.5 Abbildung zu Aufgabe 78

56.1 Der gebräuchlichste externe Speicher ist die Diskette.



56.2 Dieser PC besitzt eine Festplatte als Speicher.

Kontrollfragen

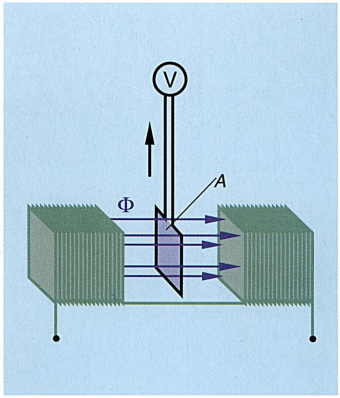
1. Was versteht man unter magnetischer Influenz?
2. Was wird durch magnetische Feldlinien dargestellt?
3. Wie stellt sich eine drehbare Magnetnadel in einem Magnetfeld ein?
4. Welche Eigenschaften hat ein homogenes Magnetfeld?
5. Was versteht man unter einem magnetischen Dipol?
6. Welchen Verlauf haben die magnetischen Feldlinien a) in der Umgebung eines stromdurchflossenen Leiters, b) in einer stromdurchflossenen Spule, und wie findet man ihre Richtung?
7. Beschreibe das Magnetfeld eines Kreisstromes.
8. Wie läßt sich die Richtung der Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld bestimmen?
9. Wie muß der stromdurchflossene Leiter relativ zu den magnetischen Feldlinien verlaufen, damit die wirkende Kraft ein Maximum bzw. Null wird?
10. Was versteht man unter dem magnetischen Fluß, was unter der magnetischen Flußdichte? In welchen Einheiten werden sie angegeben?
11. Von welchen Größen hängt die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld ab?
12. Erkläre die Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Leitern. Wie ist die Einheit der Stromstärke definiert?
13. Von welchen Größen hängt die Kraftwirkung auf eine bewegte Ladung im Magnetfeld ab?
14. Wie kann die Richtung der Lorentzkraft bestimmt werden?
15. Erkläre die Ablenkung eines Elektronenstrahls im Fadenstrahlrohr.
16. Erkläre den Halleffekt.
17. Beschreibe Aufbau und Funktion eines Zyklotrons.
18. In welchen Feldern wirken auf ruhende bzw. auf bewegte elektrische Ladungen Kräfte und durch welche Feldgrößen werden die Kräfte beschrieben?
19. Was versteht man unter magnetischer Erregung?
20. Welcher Zusammenhang besteht zwischen magnetischer Flußdichte und magnetischer Erregung im Vakuum bzw. in Luft?
21. Was versteht man unter der Durchflutung?
22. Auf welche Arten kann eine große Durchflutung erreicht werden?
23. Was gibt der Durchflutungssatz an?
24. Wie kann die magnetische Flußdichte a) in der Umgebung eines Leiters, b) im Inneren einer Ringspule, c) im Inneren einer langen Zylinderspule berechnet werden?
25. Was gibt die Permeabilitätszahl an?
26. Wodurch unterscheiden sich diamagnetische, paramagnetische und ferromagnetische Stoffe?
27. Wie kann gegen magnetische Felder abgeschirmt werden?
28. Skizziere in einer Grafik den Zusammenhang zwischen B und H für eine Luftspule und eine Eisenkernspule.
29. Was versteht man unter magnetischer Sättigung?
30. Erkläre den Verlauf der Hystereseschleife. Wie kommt sie zustande?
31. Was versteht man unter Koerzitiverregung und unter Remanenz?
32. Was gibt der Inhalt der Hystereseschleife an?
33. Welche Eigenschaften haben weichmagnetische Stoffe? Wofür werden sie verwendet?
34. Welche Eigenschaften haben hartmagnetische Stoffe? Wofür werden sie verwendet?
35. Was versteht man unter Magnetostriktion?
36. Wie lautet das Ohmsche Gesetz für den magnetischen Kreis?
37. Beschreibe Aufbau und Wirkungsweise eines Relais.
38. Erkläre Aufbau und Wirkungsweise eines Lautsprechers.
39. Von welchen Größen ist die Kraftwirkung auf die Schwingspule in einem Lautsprecher abhängig?
40. Beschreibe Aufbau und Wirkungweise des Drehspulmeßwerkes.
41. Warum besitzt ein Drehspulinstrument eine lineare Skala?
42. Wie kann der Meßbereich für die Strom- und Spannungsmessung erweitert werden?

4. Induktion

4.1 Bewegung einer Leiterschleife im Magnetfeld

Versuch

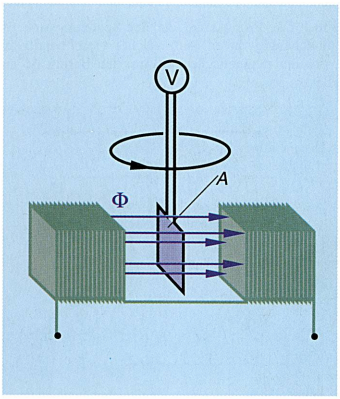
Eine flache Spule, an die ein Voltmeter angeschlossen ist, wird in ein Magnetfeld gehalten, und zwar senkrecht zu den Feldlinien. Dieses Magnetfeld kann durch Feldspulen mit Eisenkernen oder auch durch einen Dauermagneten erzeugt werden. Wird nun die Induktionsspule aus dem Feld herausgezogen (Abb. 57.1), dann zeigt das Voltmeter während des Herausziehens einen Ausschlag an. In der Spule wird eine Spannung *induziert*. Das heißt, zwischen den Anschlüssen der Spule tritt eine Spannung auf. Diese Art der Spannungserzeugung bezeichnet man als *Induktion*. Auch während der Drehung der Spule um 90° im Magnetfeld zeigt das Voltmeter einen Ausschlag an (Abb. 57.2). Wird die Spule jedoch parallel zu den magnetischen Feldlinien (eines homogenen Feldes) verschoben, dann wird keine Spannung induziert.



57.1 Wird die Spule aus dem Magnetfeld gezogen, schlägt das Voltmeter aus.

Verwendet man anstelle der Induktionsspule mit N Windungen eine Leiterschleife ($N = 1$), dann sinkt die induzierte Spannung auf den N-ten Teil ab. Zur Anzeige benötigt man dann allerdings ein sehr empfindliches Instrument (Galvanometer). Für prinzipielle Überlegungen genügt es aber, die Bewegung einer Leiterschleife zu betrachten. Für die folgende, genauere Untersuchung nehmen wir an, daß das Magnetfeld homogen und geometrisch scharf begrenzt ist und daß eine rechteckige Leiterschleife gleichförmig bewegt wird.

Zu Beginn befindet sich die Leiterschleife vollständig im Magnetfeld und wird vom Fluß $\Phi_1 = B\,A$ durchsetzt (Abb. 57.3 oben). Der Fluß Φ_1 ist die Gesamtheit aller Feldlinien, die von der Leiterschleife erfaßt werden. Während des Herausziehens aus dem Magnetfeld nimmt der die Leiterschleife durchsetzende Fluß ab (Für Abb. 57.3 Mitte gilt: $\Phi_2 \approx B\,A/2$). Ist die Leiterschleife vollständig aus dem Magnetfeld herausgezogen, wird sie von keinem Fluß mehr durchsetzt: $\Phi_3 = 0$ (Abb. 57.3 unten).



57.2 Auch durch ein Verdrehen der Spule wird eine Spannung induziert.

Während des Herausziehens ist der die Leiterschleife durchsetzende Fluß von Φ_1 auf Null gesunken. Die Flußänderung $\Delta\Phi$ ist $-\Phi_1$. Bei einer geradlinigen Bewegung, die vollständig innerhalb oder außerhalb des Feldes stattfindet, wird keine Spannung induziert. Erhöht man die Erregerstromstärke in den Feldspulen, dann steigt auch der Fluß Φ und damit auch die Flußänderung $\Delta\Phi$ beim Herausziehen der Leiterschleife. Wird die Leiterschleife wieder mit gleicher Geschwindigkeit bewegt, dann zeigt das Instrument einen höheren Ausschlag. Das heißt, die induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zur Flußänderung $\Delta\Phi$.

(1) $U_{ind} \sim \Delta\Phi$

Wird die Leiterschleife schneller herausgezogen, dann zeigt das Meßinstrument einen höheren Ausschlag. Daraus folgt, daß die induzierte Spannung umso größer ist, je weniger Zeit Δt für das Herausziehen benötigt wird:

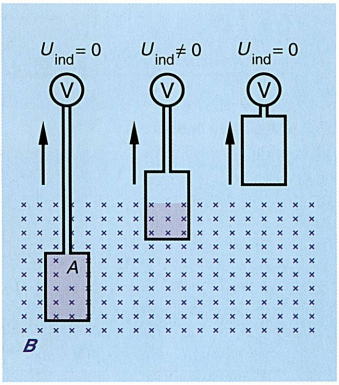
(2) $U_{ind} \sim \dfrac{1}{\Delta t}$

Aus (1), (2) folgt: $U_{ind} \sim \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Induktionsgesetz (für den Betrag der induzierten Spannung)

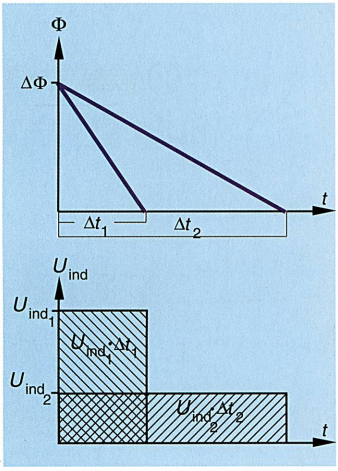
Leiterschleife: $U_{ind} = \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ Spule mit N Windungen: $U_{ind} = N\,\dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Ändert sich der eine Leiterschleife (Spule) durchsetzende Fluß, so wird in ihr eine Spannung induziert. Sie entspricht der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses. In einem geschlossenen Kreis fließt dann ein Induktionsstrom.

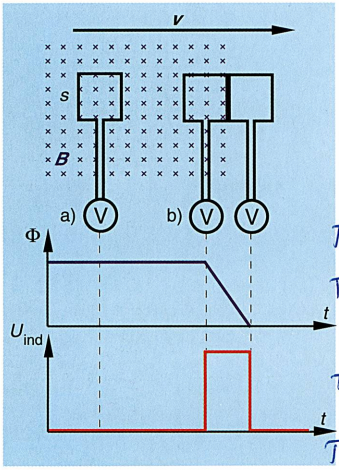


57.3 Die induzierte Spannung U_{ind} ist proportional zur Änderung des magnetischen Flusses, der die Spule durchsetzt.

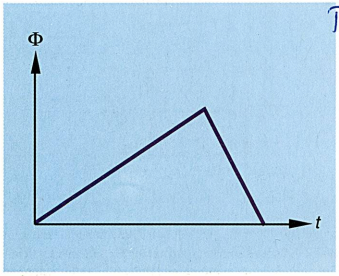
Beim gleichförmigen Herausziehen der Leiterschleife sinkt der Fluß gleichmäßig (linear) auf Null ab. Je schneller die Flußänderung vor sich geht, desto



58.1 Das Produkt $U_{ind} \cdot \Delta t$, der Spannungsstoß, ist unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit sich der magnetische Fluß um den Betrag $\Delta\phi$ ändert.



58.2 Abbildung zu Beispiel A



58.3 Abbildung zu Aufgabe 79

größer ist die induzierte Spannung (Abb. 58.1). In beiden Fällen ist die Flußänderung $\Delta\Phi$ gleich groß.

(1) $U_{ind_1} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t_1} \Leftrightarrow \Delta\Phi = U_{ind_1} \cdot \Delta t_1$

(2) $U_{ind_2} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t_2} \Leftrightarrow \Delta\Phi = U_{ind_2} \cdot \Delta t_2$

(1), (2) $U_{ind_1} \Delta t_1 = U_{ind_2} \cdot \Delta t_2$

Das Podukt $U_{ind}\,\Delta t$, der *Spannungsstoß*, hat für alle Geschwindigkeiten den gleichen Wert.

Bei Induktionsvorgängen entstehen Spannungsstöße. Durch eine bestimmte Flußänderung wird immer ein gleich großer Spannungsstoß induziert. Die Höhe der Spannung hängt von der Geschwindigkeit der Flußänderung ab.

Beispiel A

Eine quadratische Leiterschleife (s = 3 cm) wird mit v = 2 m/s durch ein homogenes Magnetfeld (B = 0,2 T) und schließlich aus dem Feld hinaus bewegt (Abb. 58.2). Berechne Flußänderung, induzierte Spannung. Skizziere den Fluß- und Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit.

Bewegung a nach b: $\Delta\Phi = 0 \Leftrightarrow U_{ind} = 0$

Bewegung b nach c:

(1) Die Flußänderung $\Delta\Phi$ hat den Betrag $\Phi = B\,A$.

(2) $v = \frac{s}{\Delta t} \Leftrightarrow \Delta t = \frac{s}{v}$

(1), (2) $U_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\,A\,v}{s} = \frac{0{,}2\ \mathrm{Vs/m^2} \cdot (0{,}03\ \mathrm{m})^2 \cdot 2\ \mathrm{m/s}}{0{,}03\ \mathrm{m}} = 0{,}012\ \mathrm{V}$

Aufgaben

79. Der eine Leiterschleife durchsetzende Fluß ändert sich wie in Abb. 58.3. Skizziere dazu den zeitlichen Verlauf der Induktionsspannung.

80. Eine Leiterschleife wird mit konstanter Geschwindigkeit in ein homogenes Magnetfeld hineinbewegt und auf der anderen Seite wieder hinausbewegt. Skizziere den zeitlichen Verlauf des die Spule durchsetzenden Flusses und denjenigen der Induktionsspannung.

81. Eine Leiterschleife wird in ein Magnetfeld hineinbewegt und anschließend wieder herausgezogen. Warum sind die Ausschläge des Meßinstrumentes entgegengesetzt gerichtet?

82. Wie ändern sich Spannungsstoß und Induktionsspannung, wenn eine Leiterschleife mit jeweils verschiedenen Geschwindigkeiten aus einem Magnetfeld gezogen wird?

83. Eine rechteckige Leiterschleife wird einmal aus dem Magnetfeld herausgezogen und dann innerhalb der gleichen Zeit im Feld um 90° gedreht. Wie unterscheiden sich die Ausschläge des Meßinstrumentes?

84. Eine quadratische Flachspule (s = 20 mm, 20 Windungen) wird mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s aus einem Magnetfeld herausgezogen. Wie groß ist die Flußdichte B, wenn die Induktionsspannung 0,4 V beträgt?

4.2 Bewegung eines Magneten

Versuch

Ein Stabmagnet wird in eine Spule eingetaucht. Ein angeschlossenes Voltmeter zeigt einen Ausschlag an (Abb. 59.1).

Auch bei der Bewegung eines Magneten (eines Magnetfeldes) ändert sich der die ruhende Spule durchsetzende Fluß. Als Folge wird eine Spannung induziert.

Nähert man der Spule einen Stabmagneten und taucht ihn schließlich in das Spuleninnere, dann nimmt der Fluß nicht gleichmäßig (nicht linear) zu, sondern etwa nach den Kurven in Abb. 59.2 oben. Der Spannungsstoß wird nicht mehr durch eine Rechteckkurve beschrieben (Abb. 59.2 unten). Die beiden Kurven gehören zu verschiedenen Eintauchgeschwindigkeiten des Magneten. Die beiden Spannungsstöße sind gleich (flächengleich), da ja die Flußänderungen $\Delta\Phi$ gleich sind. Zur größeren Eintauchgeschwindigkeit gehört die größere Spannungsspitze.

Aufgabe

85. Ein Stabmagnet fällt durch eine Spule. Skizziere den zeitlichen Verlauf des Flusses und denjenigen der induzierten Spannung.

4.3 Lenzsche Regel

Versuch

Eine Spule wird kurzgeschlossen und an einem Faden aufgehängt. Bewegt man einen Magneten auf die Spule zu, so wird diese abgestoßen (Abb. 59.4).

Durch die Bewegung des Magneten wird in der Spule eine Spannung induziert. Die kurzgeschlossene Spule stellt einen geschlossenen Stromkreis dar. Daher fließt ein Induktionsstrom, der wie jeder Strom ein magnetisches Feld erregt. Der Induktionsstrom ist nun so gerichtet, daß sein Magnetfeld den sich nähernden Magneten abstößt. Es muß also mechanische Arbeit verrichtet werden, um den Magneten zu nähern. Wäre der Induktionsstrom umgekehrt gerichtet, dann würde der Magnet angezogen werden (perpetuum mobile!). Beim Induktionsvorgang wird mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Lenzsche Regel
Der Induktionsstrom ist so gerichtet, daß er seine Ursache zu hemmen versucht.

Die Lenzsche Regel wird im Induktionsgesetz durch ein negatives Vorzeichen ausgedrückt.

Allgemeines Induktionsgesetz
Leiterschleife: $U_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ Spule mit N Windungen: $U_{ind} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$

Aufgabe

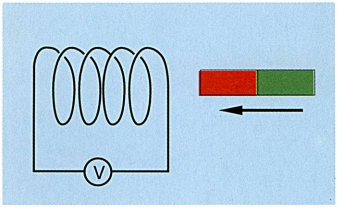
86. Bestimme die Polarität der Spulenanschlüsse (Abb. 59.1).

4.4 Bewegung eine Leiters im Magnetfeld

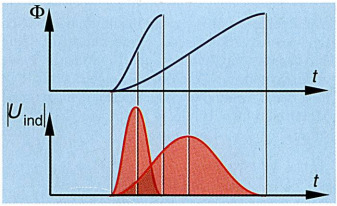
Wird eine Leiterschleife aus einem Magnetfeld gezogen, dann ändert sich der die Schleife durchsetzende Fluß. Eine Flußänderung tritt aber auch dann auf, wenn nur ein Leiterstück der Schleife verschoben wird (Abb. 59.5).

Wird der bewegliche Leiter in der Zeit Δt um das Stück Δs verschoben, dann ändert sich der Flächeninhalt um $\Delta A = l \cdot \Delta s$ und der Fluß um $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A$.

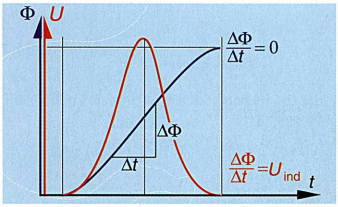
Daraus folgt: $U_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\,l\,\Delta s}{\Delta t} = B\,l\,v$, wobei v die Geschwindigkeit ist, mit welcher der Bügel verschoben wird.



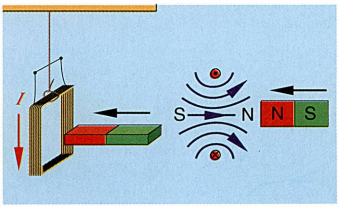
59.1 Taucht man einen Magneten in das Spuleninnere, wird die Spannung induziert.



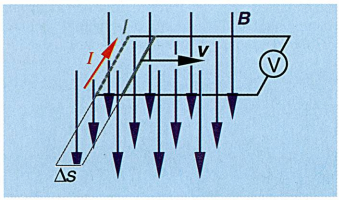
59.2 Ein Magnet wird in das Spuleninnere getaucht: Änderung des magnetischen Flusses (oben), dazugehörender Spannungsstoß (unten).



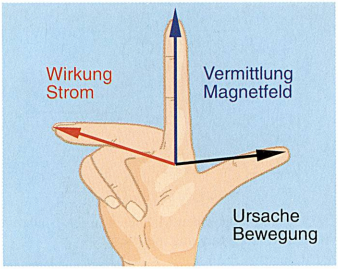
59.3 Die Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses $\Delta\Phi/\Delta t$ entspricht der Steigung der Kurve. Zur größten Steigung gehört das Maximum der Spannung, die Spannungsspitze.



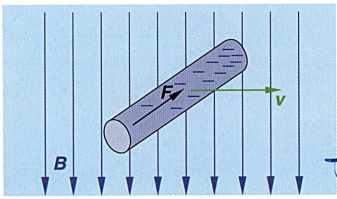
59.4 Der Induktionsstrom ist so gerichtet, daß er seine Entstehungsursache zu hemmen versucht.



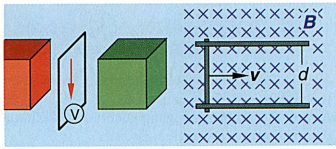
59.5 Wird der Bügel verschoben, ändert sich der magnetische Fluß, der die Schleife durchsetzt. Dabei ist l die wirksame, d. h. die Feldlinien senkrecht schneidende Leiterlänge.



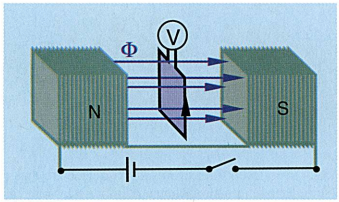
60.1 Rechte-Hand-Regel zur Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes (Generatorregel): Zeigt der Daumen in Richtung der Ursache (in Bewegungsrichtung des Leiters), der Zeigefinger in Richtung der Vermittlung (Magnetfeld), dann zeigt der Mittelfinger in Richtung der Wirkung (Induktionsstrom).



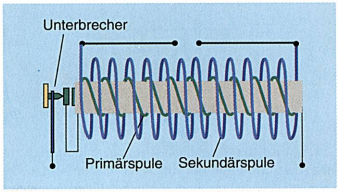
60.2 Die Lorentzkraft ist die Ursache für die Induktionsspannung.



60.3 *Links:* Abbildung zu Aufgabe 87, *rechts:* Abbildung zu Aufgabe 88.



60.4 Ändert sich der Erregerstrom der Feldspule, dann ändert sich auch deren Magnetfeld. Dadurch wird in der Leiterschleife eine Spannung induziert.



60.5 Funkeninduktor

Induktionsgesetz für einen bewegten Leiter im Magnetfeld
$U_{ind} = B\,l\,v$

Die Formel gilt nur für den Fall, daß der Leiter senkrecht zu den Feldlinien bewegt wird. Ist der Winkel zwischen Bewegungsrichtung und Feldrichtung kleiner als 90°, dann ist auch die Induktionsspannung kleiner. Wird der Leiter parallel zu den Feldlinien bewegt, dann wird keine Spannung induziert.

In einem bewegten Leiter wird eine Spannung induziert, wenn er durch ein Magnetfeld bewegt wird und dabei Feldlinien schneidet.

Die in einem bewegten Leiter induzierte Spannung bildet die Grundlage für die Stromgewinnung im Generator.

Die Richtung des Induktionsstromes ergibt sich aus der Lenzschen Regel. Sie läßt sich einfach mit Hilfe der *Rechten-Hand-Regel* bestimmen (Abb. 60.1).

Wie läßt sich der Induktionsvorgang erklären?

Wird ein Leiter quer zu den Feldlinien bewegt, dann bewegen sich auch die Elektronen mit. Auf diese bewegten Elektronen wirkt die Lorentzkraft. Es kommt zu einer Verschiebung der Elektronen zu einem Leiterende hin. Dadurch entsteht am anderen Leiterende ein Elektronenmangel. Das bedeutet: Zwischen den beiden Leiterenden herrscht eine Spannung (Abb. 60.2).

Aufgaben

87. Gib die Richtung des Induktionsstromes an (Abb. 60.3 links).

88. Auf zwei parallelen Metallstäben im Abstand von $d = 4$ cm bewegt sich ein Leiterstück senkrecht zu den Feldlinien 10 cm weit mit $v = 1{,}5$ m/s (Abb. 60.3 rechts). Berechne die induzierte Spannung bei einer Flußdichte von 0,3 T.

4.5 Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses der Feldspule

Versuch

Eine flache Spule wird im Magnetfeld zwischen zwei Feldspulen angeordnet (Abb. 60.4). Wird der Stromkreis für die Feldspulen eingeschaltet, dann steigt der Fluß durch die Spule von Null auf Φ an. Daher wird in ihr eine Spannung induziert. Beim Abschalten des Stromkreises geht der Fluß von Φ auf Null zurück. Es wird wieder eine Spannung, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, induziert.

Die Richtung des Induktionsstromes läßt sich nach der Lenzschen Regel bestimmen. Im Bild ist die Stromrichtung für den Fall eingezeichnet, daß der Erregerstrom der Feldspulen eingeschaltet wird, also der Fluß ansteigt. Der Induktionsstrom ist dann so gerichtet, daß sein Magnetfeld dem ansteigenden Fluß der Feldspulen entgegenwirkt. Eine Flußänderung wird auch durch Herausziehen des Eisenkerns aus den Feldspulen hervorgerufen. Am wichtigsten ist allerdings der Fall, daß an die Feldspulen eine Wechselspannung gelegt wird. Die Induktionsspule wird dann von einem magnetischen Wechselfeld durchsetzt. Dies bildet die Grundlage für den *Transformator*.

Ändert sich der Erregerstrom der Feldspule, dann entsteht ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, das in einer Leiterschleife (Spule) eine Spannung induziert. Es gilt wieder das allgemeine Induktionsgesetz.

Versuch (Abb. 60.5)

Der Stromkreis für die Primärspule des Funkeninduktors wird durch den Unterbrecher ständig geöffnet und geschlossen. Damit ändert sich auch der magnetische Fluß ständig, und in der Sekundärspule wird eine hohe Spannung (10 000 V) induziert. Die Anschlüsse der Sekundärspule sind mit zwei Elektroden verbunden, die einen Abstand von ca. 10 cm haben können. Die Induk-

tionsspannung ist so groß, daß diese Funkenstrecke "durchschlagen" werden kann.

Aufgabe

89. Welchen zeitlichen Verlauf muß der Erregerstrom einer Feldspule haben, damit die Induktionsspannung konstant ist?

4.6 Wirbelströme

Versuch

Ein Aluminiumring wird so aufgehängt, daß der Eisenkern einer Spule durch ihn hindurchragt (Abb. 61.1). Beim Einschalten des Erregerstromes der Feldspule wird der Ring kurzzeitig abgestoßen, beim Ausschalten wird er kurzzeitig angezogen.

Beim Einschalten steigt der magnetische Fluß durch den Ring an. Der Induktionsstrom im Ring erzeugt ein Magnetfeld, das nach der Lenzschen Regel der Flußzunahme in der Feldspule entgegenwirkt. Daher kommt es zur Abstoßung.

Versuch

Beim *Waltenhofenschen Pendel* schwingt eine dicke Kupferscheibe zwischen den Polen eines Elektromagneten (Abb. 61.2). Ist der Elektromagnet eingeschaltet, dann wird das Pendel zwischen den Polen gebremst. Es führt eine stark gedämpfte Schwingung durch.

Erklärung: Bei der Bewegung im Magnetfeld werden in der Kupferscheibe Spannungen induziert. Es fließen Induktionsströme, die wegen des geringen Widerstandes hohe Werte annehmen können. Nach der Lenzschen Regel sind sie so gerichtet, daß ihre Magnetfelder ihre Ursache zu hemmen versuchen. Diese geschlossenen Induktionsströme nennt man *Wirbelströme* (Abb. 61.3). Diese Wirbelströme führen zu einer Erwärmung, es treten Wirbelstromverluste auf. Wird die volle Kupferscheibe durch eine geschlitzte Scheibe ersetzt (Abb. 61.4), dann wird das Pendel wesentlich geringer gebremst. Durch die Schlitze werden nämlich die Stromwege unterbrochen, es treten nur schwache Wirbelströme auf. Auch durch magnetische Wechselfelder werden Wirbelströme induziert. Daher treten in den Eisenkernen von Spulen, die an Wechselstrom angeschlossen sind, Wirbelströme und damit Verluste auf. Um sie zu vermeiden, werden die Kerne von Maschinen und Transformatoren aus dünnen, untereinander isolierten Blechen zusammengesetzt. Ferrite besitzen einen so hohen elektrischen Widerstand, daß praktisch keine Wirbelstromverluste auftreten.

Wird ein leitender, ausgedehnter Körper in einem Magnetfeld bewegt, oder befindet er sich in einem magnetischen Wechselfeld, dann werden in ihm Wirbelströme induziert. Diese führen zu einer Erwärmung und damit zu Energieverlusten.

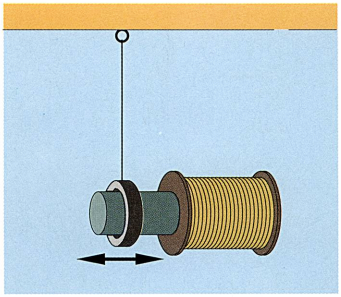
Wirbelströme werden aber auch für spezielle Zwecke ausgenützt: Wirbelstrombremse, Dämpfung von elektrischen Meßwerken, Wirbelstromwärme in Metallurgie und Medizin.

4.7 Selbstinduktion

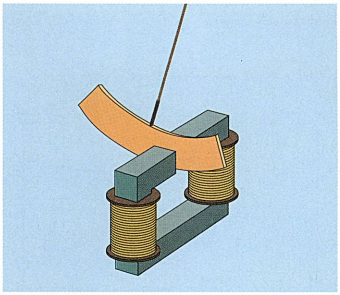
Einschalten einer Spule

Versuch

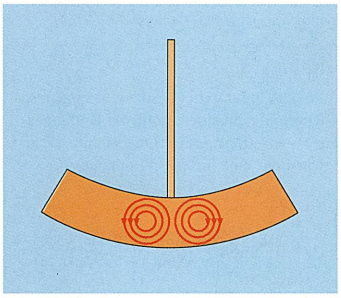
Zuerst wird der regelbare Widerstand bei geschlossenem Schalter so verändert, daß beide Lampen gleich hell leuchten (Abb. 62.2). Dann wird der Schalter wieder geöffnet. Bei neuerlichem Schließen des Schalters sind beide Lampen genau zu beobachten. Die Lampe L_2, die in Serie zur Spule liegt, leuchtet etwas später auf als die andere Lampe. Wird die Spule ohne Eisenkern verwendet, dann ist die Verzögerung sehr gering.



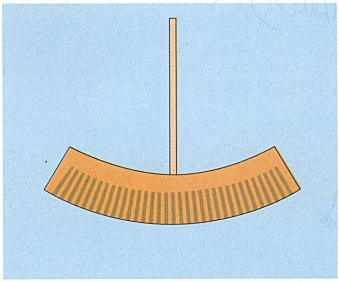
61.1 Beim Einschalten des Erregerstromes wird der Ring abgestoßen, beim Ausschalten angezogen.



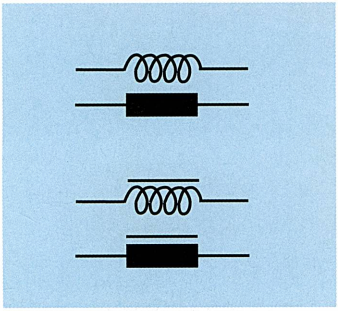
61.2 Waltenhofensches Pendel



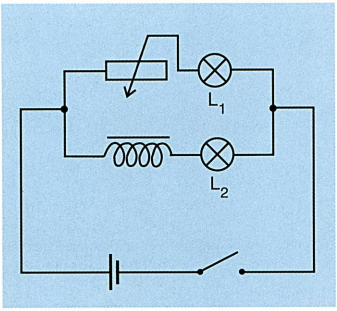
61.3 Das Pendel wird durch entstehende Wirbelströme abgebremst.



61.4 Ist die Pendelscheibe geschlitzt, dann wird das Pendel wesentlich weniger abgebremst.



62.1 Schaltzeichen einer Spule ohne und mit Eisenkern

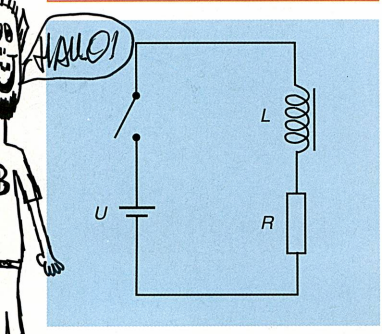


62.2 Die Lampe L_2 leuchtet nach dem Einschalten merklich später auf als Lampe L_1.

Beispiel A

Welche Induktivität besitzt eine eisenlose Ringspule mit einem mittleren Durchmesser von 10 cm, einer Querschnittsfläche von 4 cm^2 und mit 500 Windungen?

$$L = \frac{\mu_0 A N^2}{l} = \frac{1{,}256 \cdot 10^{-6}\ \text{Vs/Am} \cdot 4 \cdot 10^{-4}\ \text{m}^2 \cdot 500^2}{0{,}1\ \text{m}\ \pi} = 3{,}6\ \text{m H}$$



62.3 Den Ohmschen Widerstand einer Spule denkt man sich mit deren Induktivität in Serie geschaltet.

Wie läßt sich dieses verzögerte Aufleuchten der Lampe erklären? Bisher haben wir immer den Fall betrachtet, daß die Flußänderung einer Feldspule in einer zweiten Spule (Induktionsspule) eine Spannung induziert. Nun wird aber auch die Feldspule selbst von ihrem eigenen, sich ändernden Fluß durchsetzt. Daher wird in der Feldspule selbst eine Spannung induziert.

Verursacht eine Spule einen sich ändernden magnetischen Fluß, dann wird in der Spule *selbst* eine Spannung induziert. Diese wird als *Selbstinduktionsspannung* U_L bezeichnet. Eine Flußänderung tritt beim Ein- und Ausschalten des Spulenstromkreises oder allgemein bei einer Änderung der Spulenstromstärke auf.

Nach der Lenzschen Regel ist die Selbstinduktionsspannung der angelegten Spannung entgegengerichtet. Sie wird daher auch als Gegenspannung bezeichnet. Diese drosselt den Stromfluß im Augenblick des Einschaltens. Daher wird der Stromanstieg verzögert.

Nach dem allgemeinen Induktionsgesetz gilt für die Selbstinduktionsspannung

U_L: $U_L = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

Für eine Zylinder- oder Ringspule ohne Eisenkern gilt:

(1) $\Phi = B A$, (2) $B = \mu_0 H$ (3) $H = \frac{I N}{l}$

(1), (2), (3) $\Phi = \frac{\mu_0 A N}{l} I$

Der Quotient $\frac{\mu_0 A N}{l}$ ist eine Konstante. Daher wird eine Änderung des magnetischen Flusses ausschließlich durch eine Änderung der Stromstärke hervorgerufen. Daraus folgt:

$\Delta \Phi = \frac{\mu_0 A N}{l} \Delta I$ und $U_L = -\frac{\mu_0 A N^2}{l} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$. $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ ist die Änderungsgeschwindigkeit der Stromstärke.

Die Selbstinduktionsspannung U_L ist von der Änderung der Stromstärke und von den "Spulendaten" abhängig. Diese werden zu einer Konstanten L zusammengefaßt, die man als *Induktivität* bezeichnet. Eine Spule ist durch ihre Induktivität L gekennzeichnet.

$U_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Induktivität oder Selbstinduktionskoeffizient einer Spule ohne Eisenkern:

$L = \frac{\mu_0 A N^2}{l}$

$[L] = 1$ Vs/A = 1 Henry (1 H)

Für eine Ringspule mit Eisenkern gilt:

$L = \frac{\mu_r \mu_0 A N^2}{l}$

Durch den Eisenkern vergrößert sich die Induktivität um den Faktor μ_r. Allerdings ist L nicht mehr konstant, sondern von der Stromstärke abhängig.

Nun soll der Einschaltvorgang noch etwas genauer betrachtet werden. Jede Spule besitzt auch einen Ohmschen Widerstand. Diesen kann man sich mit der Induktivität in Serie geschaltet vorstellen (Abb. 62.3).

Aus $U_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ erhält man $\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{U_L}{L}$.

Im Augenblick des Einschaltvorganges ist die Selbstinduktionsspannung U_L gleich groß wie die angelegte Spannung U, aber entgegengerichtet. Betrachtet man ein kleines Zeitintervall Δt, dann ist die Stromstärke noch so gering, daß der Spannungsabfall am Widerstand vernachlässigt werden kann.

Aus $\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{U_L}{L}$ und $U_L = -U$ folgt $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U}{L}$. Das ist der Stromanstieg zu Beginn des Einschaltvorganges.

Je größer die Induktivität L ist, desto langsamer erfolgt der Stromanstieg beim Einschalten.

Im weiteren Verlauf des Einschaltvorganges nimmt die Stromstärke immer langsamer zu, die Selbstinduktionsspannung (Gegenspannung) sinkt ab. Schließlich stellt sich eine konstante Stromstärke I_o ein, die durch den Widerstand der Spule bestimmt wird (stationärer Zustand). Die Selbstinduktionsspannung ist dann Null.

Beispiel B

Eine Spule (L = 30 mH) ist mit einem Widerstand (R = 4 Ω) in Serie geschaltet.

Welcher Stromanstieg ist im Augenblick des Einschaltens vorhanden, wenn die angelegte Spannung 12 V beträgt (Abb. 63.1 oben)?

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{U}{L} = \frac{12\ \text{V}}{0{,}03\ \text{H}} = 400\ \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

Welche stationäre Stromstärke stellt sich ein (Abb. 63.1 unten)?

$$I_o = \frac{U}{R} = \frac{12\ \text{V}}{4\ \Omega} = 3\ \text{A}$$

Betrachtet man einen beliebigen Zeitpunkt während des Einschaltvorganges, dann ist auch der Spannungsabfall am Widerstand zu berücksichtigen:

$$U = I\,R + L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}$$

In dieser Gleichung ist U die angelegte Spannung, I die Stromstärke, $I\,R$ der Spannungsabfall und $L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}$ die Selbstinduktionsspannung zum Zeitpunkt t.

Zwischen der maximalen Stromstärke I_o, die sich nach einiger Zeit einstellt, und der Stromstärke I zum Zeitpunkt t besteht der folgende Zusammenhang:

$$I = I_o\,(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

Die Gleichung beschreibt den zeitlichen Verlauf der Stromstärke beim Einschalten einer Spule.

Da die Induktivität einer Eisenkernspule wesentlich größer ist als die einer gleichartigen Luftspule, verursacht die Eisenkernspule eine viel größere Einschaltverzögerung (Abb. 63.2).

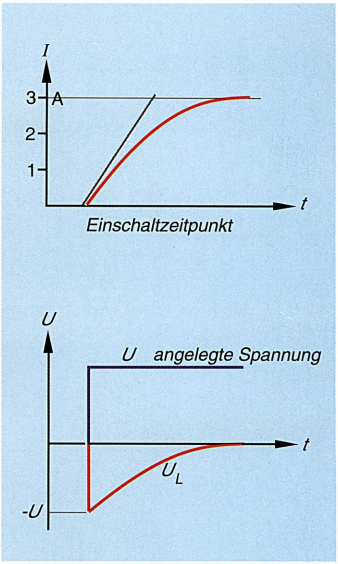
Abschalten einer Spule

Auch beim Abschalten ändert sich die Stromstärke und damit der magnetische Fluß. Daher wird in der Spule eine Selbstinduktionsspannung induziert. Diese ist im Sinne der Lentzschen Regel gegen ihre Entstehungsursache gerichtet. Da die Entstehungsursache der "Zusammenbruch" des Stromkreises ist, sucht der Induktionsstrom diesen Stromkreis zu verstärken. Kurz: Er versucht, dem Abschaltvorgang entgegenzuwirken.

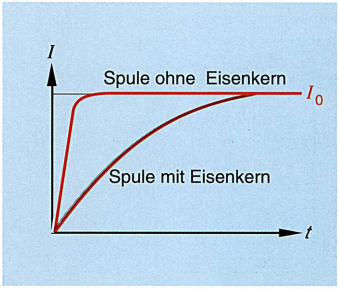
Versuch

An eine Glimmlampe mit einer Zündspannung von ca. 100 V wird eine Gleichspannung von ca. 10 V gelegt. Parallel zur Glimmlampe wird eine Eisenkernspule geschaltet. Beim Abschalten leuchtet die Glimmlampe kurz auf, beim Einschalten jedoch nicht (Abb. 63.3).

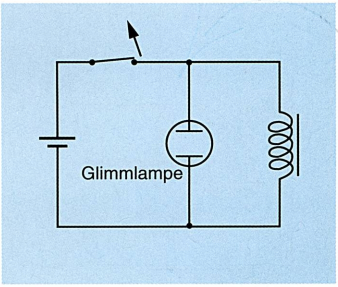
Daraus kann geschlossen werden, daß beim Abschalten der Spule eine Selbstinduktionsspannung auftritt, die wesentlich größer ist als die ursprünglich angelegte Spannung.



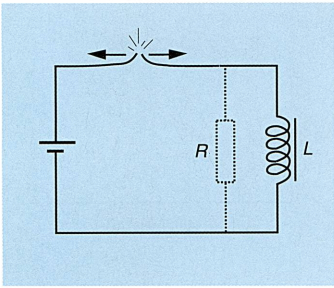
63.1 Abbildung zu Beispiel B. *Oben:* Die Steigung des Geradenstücks entspricht dem Anstieg der Stromstärke zu Beginn des Einschaltvorganges. *Unten:* Nach einiger Zeit ist U_L auf Null gesunken. Es gilt nun wieder das Ohmsche Gesetz.



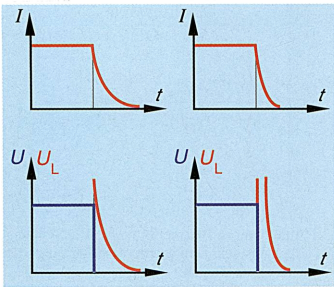
63.2 Die wesentlich größere Induktivität der Spule mit Eisenkern bewirkt, daß die Stromstärke I_o wesentlich später erreicht wird.



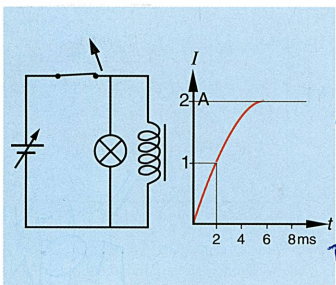
63.3 Das Aufleuchten der Glimmlampe ist ein Beweis für die hohe Selbstinduktionsspannung beim Ausschalten.



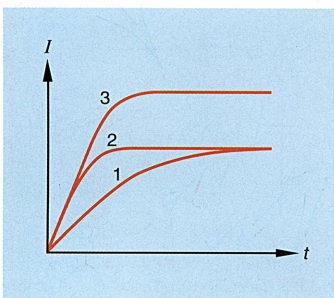
64.1 Beim Öffnen des Stromkreises springt ein Funke über.



64.2 *Links:* kleiner Parallelwiderstand – kleine Spannungsspitze, *rechts:* großer Parallelwiderstand – große Spannungsspitze



64.3 *Links:* Abbildung zu Aufgabe 91, *rechts:* Abbildung zu Aufgabe 92



64.4 Abbildung zu Aufgabe 93

Versuch

Ein Stromkreis, bestehend aus Eisenkernspule und Gleichstromquelle (5 – 10 V), wird durch Berühren der Leitungsdrähte geschlossen (Abb. 64.1). Während beim Öffnen des Stromkreises ein Funke (Überschlag) zu beobachten ist, tritt beim Schließen kein Funke auf. Als nächstes wird etwa ein 100 kΩ Widerstand zur Spule parallelgeschaltet. Wieder ist beim Öffnen ein Funke zu beobachten. Bei einem Parallelwiderstand von 50 Ω tritt kein Funke mehr auf.
Je größer der Parallelwiderstand der Spule ist, desto schneller fällt auch die Stromstärke ab und desto größer ist die Selbstinduktionsspannung (Abb. 64.2). Beim Abschalten fällt die Stromstärke viel schneller ab, als sie beim Einschalten zunimmt, daher tritt auch eine höhere Selbstinduktionsspannung auf. Eine Spule wirkt nach dem Abschalten kurzzeitig wie eine Spannungsquelle.
Eine Glimmlampe etwa besitzt einen hohen Widerstand, daher erreicht die Selbstinduktionsspannung beim Abschalten der Spule einen so hohen Wert, daß die Lampe gezündet wird. Wird eine Spule ohne Parallelwiderstand abgeschaltet, dann sind nur der hohe Isolationswiderstand und der Luftwiderstand vorhanden. Eine Spule besitzt auch eine im allgemeinen geringe Wicklungskapazität. Durch die hohe Selbstinduktionsspannung kommt es zu Überschlägen (Funken) bei Kontakten. Beim plötzlichen Abschalten von elektrischen Geräten und Maschinen (Elektromagnet, Motor) kann die Isolierung von Wicklungen zerstört werden, und es kann zu Kurzschlüssen kommen. Durch Parallelschalten eines Kondensators kann die Funkenbildung verhindert werden. Beim Öffnen des Kontaktes wird der Kondensator aufgeladen und dadurch der Spannungsabfall verlangsamt.

Beim Einschalten einer Spule verhindert die Selbstinduktionsspannung einen plötzlichen Stromanstieg. Umgekehrt verhindert sie beim Abschalten einen plötzlichen Stromabfall. Allerdings kann dabei eine hohe Spannungsspitze auftreten. Durch die Selbstinduktion besitzt der Strom eine Trägheit, ähnlich wie die Trägheit der Masse bei einer Beschleunigung oder Verzögerung.

Aufgaben

90. Berechne die Induktivität einer 20 cm langen Spule mit einer Querschnittsfläche von 20 cm^2 und 5000 Windungen.

T **91.** Die Gleichspannung wird so eingestellt, daß das Lämpchen nur schwach leuchtet (Abb. 64.3 links). Was ist beim Ausschalten zu beobachten?

92. An einer Spule liegt eine Spannung von 6 V. a) Bestimme aus der Abb. 64.3 rechts die Anfangssteigung der Kurve und berechne die Induktivität der Spule. b) Berechne den Widerstand der Spule.

TK **93.** Abb. 64.4 zeigt das Einschaltverhalten dreier Spulen, die an der gleichen Spannung liegen. Wodurch unterscheiden sie sich?

94. Eine Spule (L = 0,25 H, R = 40 Ω) wird an eine Spannung von 12 V geschaltet. Skizziere mit Hilfe der Anfangssteigung der Stromstärke die Strom-Zeit-Kurve für den Einschaltvorgang.

4.8 Energie des magnetischen Feldes

Beim Einschalten einer Spule steigt die Stromstärke verzögert an und baut ein magnetisches Feld auf. Um die dazu erforderliche Arbeit zu erhalten, berechnen wir zuerst die Leistung. Ausgangspunkt der Rechnung sind die Spannungen, die zu einem beliebigen Zeitpunkt t während des Einschaltvorganges auftreten:

(1) $U = I R + L \frac{\Delta I}{\Delta t}$

Multipliziert man die Gleichung mit der momentanen Stromstärke, dann erhält man die momentanen Leistungen:

(2) $U I = I^2 R + L \frac{\Delta I}{\Delta t} I$

In Worten: Die momentane Leistung der Stromquelle ($U\,I$) ist die Summe von momentaner Verlustleistung am Widerstand ($I^2\,R$) und momentaner Leistung zum Aufbau des Magnetfeldes ($L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}\,I$).

➤ Beispiel A

An eine Spule ($L = 0{,}002$ H, $R = 5\ \Omega$) wird eine Spannung von 6 V angelegt. Während des Einschaltvorganges steigt die Stromstärke von Null auf den stationären Wert I_o an.

$$I_o = \frac{U}{R} = \frac{6\ \text{V}}{5\ \Omega} = 1{,}2\ \text{A}$$

Die momentane Leistung der Stromquelle und die momentane Verlustleistung am Widerstand werden in Abhängigkeit von der Stromstärke berechnet. Die Leistung zum Aufbau des Magnetfeldes ergibt sich als Differenz dieser beiden Leistungen (Tab. 65.1).

In Abb. 65.3 sind die Leistung der Stromquelle und die Verlustleistung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Der Flächeninhalt zwischen den beiden Leistungskurven entspricht der Arbeit, die zum Aufbau des magnetischen Feldes erforderlich ist. Ist der Einschaltvorgang beendet, dann dient die aufgenommene Leistung nur noch zur Deckung der Ohmschen Verluste der Spule.

Nach Gleichung (2) gilt für die momentane Leistung P zum Aufbau des Feldes: $P = L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}\,I$. Daraus folgt für die entsprechende Arbeit $\Delta\,W$ im (sehr klein angenommenen) Zeitintervall $\Delta\,t$:

(3) $\Delta\,W = P \cdot \Delta\,t = L\,I \cdot \Delta\,I$

Abb. 65.4 stellt das $L \cdot I$-I-Diagramm einer Luftspule dar. Da für eine Luftspule $L = const.$, ist der Graph ein Geradenstück.

$\Delta\,W$ entspricht dem Flächeninhalt eines Rechtecks mit den Seiten $L.I$ und $\Delta\,I$. Die gesamte Arbeit zum Feldaufbau entspricht dem Flächeninhalt des Dreiecks mit den Katheten $L.I_o$ und I_o:

(4) $W = \frac{L\,I_o^2}{2}$

Arbeit zum Aufbau eines magnetischen Feldes = Energie des magnetischen Feldes einer Spule

$$W = E_{magn} = \frac{L\,I_o^2}{2}$$

Mit Hilfe der Integralrechnung läßt sich die Arbeit zum Aufbau des magnetischen Feldes rasch berechnen:

(4') $d\,W = L\,I\,d\,I \;\Rightarrow\; W = L\int_o^{I_o} I\,d\,I = \left[L\,\frac{I^2}{2}\right]_o^{I_o} = \frac{L\,I_o^2}{2}$

➤ Beispiel B

Wie groß ist die Energie, welche im Magnetfeld der Spule von Beispiel A nach Beendigung des Einschaltvorganges gespeichert ist?

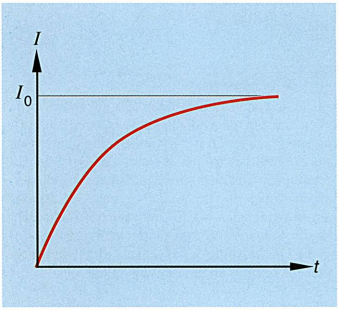
$$W = \frac{L\,I_o^2}{2} = \frac{0{,}002\ \text{H} \cdot (1{,}2\ \text{A})^2}{2} = 1{,}44 \cdot 10^{-3}\ \text{J}$$

Nach Beendigung des Einschaltvorganges ist im magnetischen Feld der Spule die Energie $1{,}44 \cdot 10^{-3}$ J gespeichert.

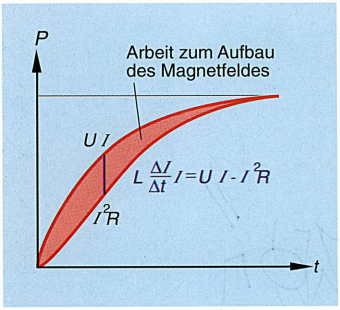
Die Spule nimmt im weiteren die Verlustleistung $I_o^2\,R = (1{,}2\ \text{A})^2 \cdot 5\ \Omega = 7{,}2$ W auf.

Stromstärke I	Leistung der Stromquelle $U\,I$	Verlustleistung $I^2\,R$	Leistung zum Feldaufbau $L\,\frac{\Delta I}{\Delta t}\,I$
0	0	0	0
0,2	1,2	0,2	1,0
0,4	2,4	0,8	1,6
0,6	3,6	1,8	1,8
0,8	4,8	3,2	1,6
1,0	6,0	5,0	1,0
1,2	7,2	7,2	0

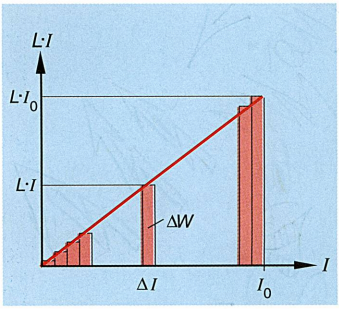
65.1 Wertetabelle zu Beispiel A



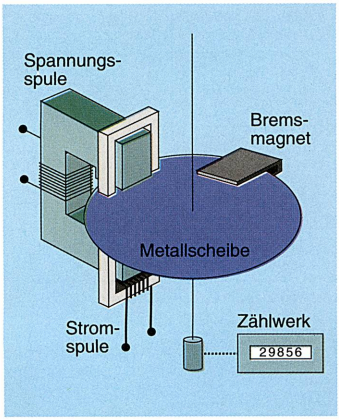
65.2 I-t-Diagramm zu Beispiel A



65.3 P-t-Diagramm zu Beispiel A



65.4 L-I-I-Diagramm einer Luftspule



66.1 Schemadarstellung eines "Stromzählers". Die beiden um 90° gegeneinander versetzten Elektromagnete erzeugen in der Metallscheibe phasenverschobene Wirbelströme, die auf die Scheibe ein Drehmoment ausüben. Der Bremsmagnet induziert Wirbelströme, die die Scheibe bremsen. Ist das Bremsmoment gleich dem Drehmoment, dann dreht sich die Scheibe mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Die Leistung des Wechselstroms ist proportional zu dieser Winkelgeschwindigkeit.

Energiedichte des magnetischen Feldes

Für eine lange Zylinderspule gilt:

(1) $I_o = \frac{Hl}{N}$ (2) $L = \frac{\mu_o A N^2}{l}$ (3) $E_{magn} = \frac{L I_o^2}{2}$

Setzt man die rechten Seiten von (1) und (2) in (3) ein, erhält man:

$E_{magn} = \frac{\mu_o H^2 A l}{2} = \frac{\mu_o H^2 V}{2}$. Dividiert man durch das Volumen V, erhält man die Energiedichte $\frac{E_{magn}}{V}$ des magnetischen Feldes: $\frac{E_{magn}}{V} = \frac{1}{2}\mu_o H^2$

Setzt man $H = \frac{B}{\mu_o}$, erhält man schließlich: $\frac{E_{magn}}{V} = \frac{B^2}{2\mu_o}$

Beim Einschalten einer Spule wird ein magnetisches Feld aufgebaut. Die dazu erforderliche elektrische Energie wird als magnetische Feldenergie gespeichert.Die Leistungsaufnahme nach Beendigung des Einschaltvorganges dient nur zur Deckung der Ohmschen Verluste der Spule. Zur Aufrechterhaltung des magnetischen Feldes ist keine Leistung erforderlich.
Beim Abschalten der Spule bricht das magnetische Feld zusammen. Die gespeicherte magnetische Energie wird abgegeben. Sie wird in elektrische Energie (Funke) umgewandelt. Die abgeschaltete Spule wirkt kurzzeitig wie eine Stromquelle.

Aufgabe

95. An eine Spule (L = 0,2 H, R = 25 Ω) wird eine Spannung von 6 V gelegt. Nach 20 s wird die Spule wieder abgeschaltet.
a) Welche elektrische Energie wird zum Aufbau des Magnetfeldes benötigt? b) Wie groß ist die gespeicherte magnetische Energie? c) Wie groß ist die Verlustleistung, und welche Energie wird im eingeschalteten Zustand verbraucht?

Kontrollfragen

FORMELN

1. Was versteht man unter Induktion?
2. Erkläre das Induktionsgesetz.
3. Auf welche Arten kann in einer Leiterschleife eine Spannung induziert werden?
4. Was ist ein Spannungsstoß und wovon ist seine Größe abhängig?
5. Unter welchen Bedingungen ist die induzierte Spannung konstant?
6. Erkläre die Lenzsche Regel und ihre Bedeutung.
7. Erkläre die Rechte-Hand-Regel.
8. Was sind Wirbelströme und wie entstehen sie?
9. Wie kann man Wirbelströme verhindern oder zumindest schwächen?
10. Wozu kann man Wirbelströme ausnützen?
11. Was versteht man unter der Selbstinduktionsspannung und wie entsteht sie?
12. Von welchen Größen hängt die Selbstinduktionsspannung ab?
13. Was ist die Induktiviät und in welcher Einheit wird sie angegeben?
14. Warum kommt es beim Einschalten einer Spule zu einem verzögerten Stromanstieg?
15. Warum wird beim Abschalten einer Spule der Stromabfall verzögert?
16. Welches Problem kann beim Abschalten einer Spule auftreten?
17. Von welchen Größen hängt die Energie des magnetischen Feldes einer Spule ab?
18. Wozu dient die von einer Spule aufgenommene Leistung: a) während des Einschaltvorganges, b) nach Beendigung des Einschaltvorganges?
19. Was geschieht beim Abschalten einer Spule mit der gespeicherten Energie?

5. Wechselstrom

Ein *Gleichstrom* (Bezeichnung: – oder DC) behält stets seine Richtung bei. Bei einem idealen oder reinen Gleichstrom bleibt die Stromstärke auch konstant (Abb. 67.1 links). Ändert sich die Stromrichtung, so spricht man von einem *Wechselstrom* (Bezeichnung: ~ oder AC). Von besonderer Bedeutung ist ein *sinusförmiger Wechselstrom* (Abb. 67.1 rechts).

5.1 Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

Rotiert eine Leiterschleife mit konstanter Winkelgeschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld, dann ändert sich der sie durchsetzende magnetische Fluß ständig. Daher wird in der Leiterschleife auch ständig eine Spannung induziert (Abb. 67.2).

Ist die Leiterschleife um den Winkel φ gegen die Normalstellung zu den Feldlinien verdreht, dann wird sie vom Fluß $\Phi = B\,A \cos \varphi$ durchsetzt. Mit $\varphi = \omega\, t$ erhält man

$$\Phi = B\,A \cos \omega\, t$$

Der die Leiterschleife durchsetzende Fluß ändert sich mit dem Drehwinkel φ und auch mit der Zeit t nach einer Kosinusfunktion (Abb. 67.3 oben). Die Sekantensteigung im Zeitintervall $\Delta\, t$ entspricht der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses $\Delta\, \Phi / \Delta\, t$. Läßt man $\Delta\, t$ gegen Null streben, geht die Sekante in eine Tangente über. Deren Steigung entspricht der momentanen Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses zum Zeitpunkt t und somit auch dem Betrag der Spannung, die zu diesem Zeitpunkt induziert wird. Damit ist man in der Lage, das U-t-Diagramm für die induzierte Spannung zu zeichnen (Abb. 67.3 unten). Dem Φ-t-Diagramm kann man entnehmen:

An der Stelle $t = 0$ ist die Steigung der Kurve Null, daher ist auch $U_{ind} = 0$. An der Stelle $t = T/4$ ist die Steigung ein Minimum. Daher erreicht die induzierte Spannung ein Maximum (wegen des negativen Vorzeichens im Induktionsgesetz!).

Trägt man nun die Steigungen der Φ-t-Kurve zu verschiedenen Zeiten – unter Berücksichtigung des negativen Vorzeichens – gegen die Zeit auf, dann erhält man für den Verlauf der induzierten Spannung eine Sinuskurve.

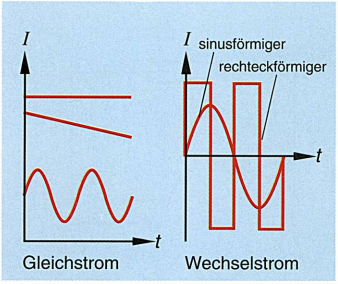
Mit der Einführung der Scheitelspannung U_o und der Bezeichnung $U_{ind} = u$ erhält man

$$u = U_o \sin \omega\, t$$

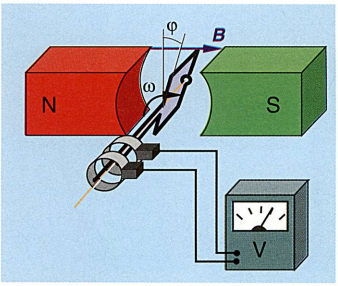
u ... Momentanwert der Spannung
U_o ... Scheitelwert (Maximalwert, Spitzenwert) der Spannung
T ... Periodendauer, Periode, Zeit für eine Umdrehung der Leiterschleife
$\varphi = \omega\, t$ ... Phasenwinkel, Phase, Drehwinkel der Leiterschleife

In Abb. 67.3 unten ist der zeitliche Verlauf der Wechselspannung durch ein Liniendiagramm dargestellt. Eine andere Darstellungsmöglichkeit erhält man durch das *Zeigerdiagramm.* Man denkt sich einen Zeiger (Pfeil) mit der Länge U_o, der sich um seinen Anfangspunkt mit der Winkelgeschwindigkeit ω gegen den Uhrzeigersinn dreht (Abb. 67.4). Der Zeiger rotiert also mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie die Leiterschleife im Magnetfeld. Jede momentane Zeigerstellung entspricht genau der Lage der Leiterschleife. Die Projektion des Zeigers auf die Vertikale ergibt den Momentanwert der Spannung. Trägt man Momentanwerte für verschiedene Zeitpunkte (Drehwinkel) gegen die Zeit (den Drehwinkel) auf, erhält man das Liniendiagramm.

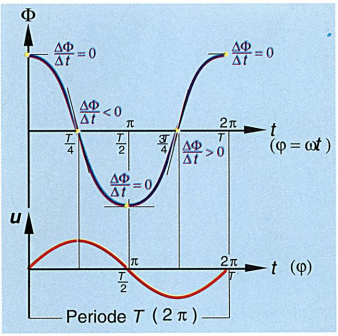
Während einer Periode führt der Zeiger einen Umlauf durch. Im Zeigerdiagramm wird die Lage des Zeigers zum Zeitpunkt $t = 0$ (Phasenwinkel $\varphi = 0$) dargestellt. Üblicherweise wird aber durch den Zeiger nicht der Scheitelwert U_o, sondern der sogenannte Effektivwert $U = \frac{U_o}{\sqrt{2}}$ dargestellt (siehe Abschnitt 5.2).



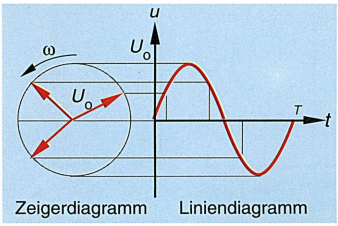
67.1 *Links:* Gleichströme, *rechts:* sinusförmiger und rechteckförmiger Wechselstrom



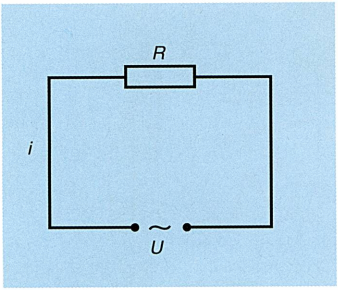
67.2 In der rotierenden Leiterschleife wird ständig Spannung induziert.



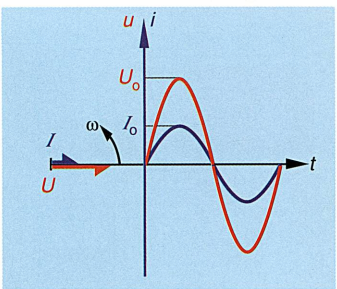
67.3 *Oben:* Magnetischer Fluß Φ, der eine rotierende Leiterschleife durchsetzt, *unten:* Spannung U_{ind}, die in der rotierenden Leiterschleife induziert wird



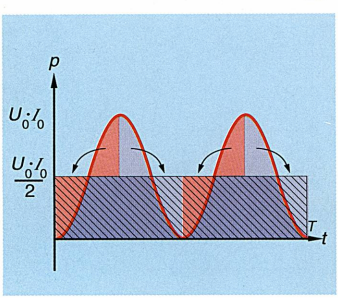
67.4 Ermittlung der u-t-Kurve mit Hilfe eines Zeigerdiagramms



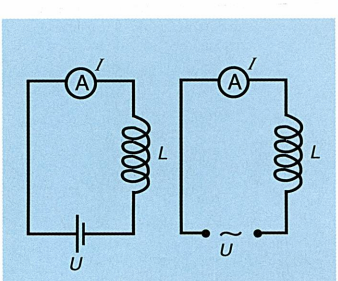
68.1 Widerstand R im Wechselstromkreis



68.2 Zeiger- und Liniendiagramm des u- und des i-Verlaufes in einem Wechselstromkreis mit einem Ohmschen Widerstand



68.3 Momentane und mittlere Leistung des Wechselstromes



68.4 Eine Spule im Gleich- und im Wechselstromkreis

Rotiert eine Leiterschleife (Spule) mit konstanter Winkelgeschwindigkeit in einem homogenen Magnetfeld, dann wird in ihr eine sinusförmige Wechselspannung $u = U_o \sin \omega t$ induziert.

5.2 Einfacher Wechselstromkreis

Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis

Wird ein Ohmscher Widerstand an eine Wechselstromquelle angeschlossen, dann wird er von einem Wechselstrom i durchflossen (Abb. 68.1):

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_o \sin \omega t}{R}$$

Mit $\frac{U_o}{R} = I_o$ erhält man:

$$i = I_o \sin \omega t$$

u und i erreichen zur gleichen Zeit ihre Scheitelwerte, sie sind *phasengleich* (Abb. 68.2). Da sich Spannung und Stromstärke mit der Zeit ändern, ändert sich auch die Leistung ständig.

Momentane Leistung p

$$p = u\,i = U_o I_o \sin^2 \omega t$$

Stromstärke und Spannung sind stets gleichzeitig negativ, daher ist die Leistung immer positiv. Für die Arbeit, die der Wechselstrom verrichtet, ist nicht die Spitzenleistung $U_o I_o$ entscheidend, sondern eine mittlere Leistung, die der eines Gleichstromes entspricht. Die Fläche im p-t-Diagramm stellt die Stromarbeit am Widerstand R während einer Periode T dar (Abb. 68.3). Verwandelt man die Fläche unter der Leistungskurve in ein flächengleiches Rechteck, so erhält man die konstante, mittlere Leistung, die der eines Gleichstromes entspricht.

Die konstante, mittlere Leistung ist gleich der halben Spitzenleistung:

$$P = \frac{U_o I_o}{2} = \frac{U_o}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Effektivwert I der Stromstärke: $I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

Effektivwert U der Spannung: $U = \frac{U_o}{\sqrt{2}}$

Damit ergibt sich für die mittlere Leistung $P = U\,I$

Der Effektivwert der Stromstärke ist jene Stromstärke, die ein Gleichstrom haben müßte, um die gleiche Leistung wie ein Wechselstrom herzugeben.

Die Angabe eines Wechselstromes erfolgt normalerweise durch seine Effektivwerte (U, I).

Der Effektivwert der Netzspannung beträgt 220 V. Für den Scheitelwert U_o gilt demnach: $U_o = U \cdot \sqrt{2} = 220\ \text{V} \cdot \sqrt{2} = 311\ \text{V}$

Meßinstrumente zeigen im allgemeinen die Effektivwerte an.

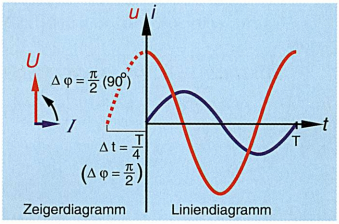
Ideale Spule im Wechselstromkreis

Versuch

Eine Spule wird zuerst an eine Gleichspannung und dann an eine Wechselspannung mit gleichem Effektivwert angeschlossen (Abb. 68.4). Bei Wechselstrom zeigt das Amperemeter eine kleinere Stromstärke an als bei Gleichstrom. Das heißt, der *Wechselstromwiderstand* der Spule ist größer als ihr

Gleichstromwiderstand (Ohmscher Widerstand). Man spricht von der *Drosselwirkung* einer Spule bei Wechselstrom. Der Ohmsche Widerstand soll für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt werden. Es liegt dann eine *ideale Spule* oder eine *reine Induktivität* vor. Beim Ansteigen des Wechselstromes wird in der Spule durch Selbstinduktion eine Gegenspannung induziert. Sie bewirkt ein verzögertes Ansteigen des Stromes. Der Strom erreicht erst dann seinen Scheitelwert, wenn die Spannung schon auf Null gesunken ist (Abb. 69.1).

In einer idealen Spule eilt die Spannung der Stromstärke um $90^\circ (\frac{\pi}{2})$ voraus.



69.1 In einem Wechselstromkreis mit idealer Spule eilt die Spannung der Stromstärke voraus. Die Phasendifferenz beträgt 90°.

Induktiver Widerstand

In einem Gleichstromkreis ergibt das Verhältnis $\frac{U}{I} = R$ den Ohmschen Widerstand des Stromkreises. In einem Wechselstromkreis mit idealer Spule stellt das Verhältnis $\frac{U_o}{I_o} = X_L$ den *induktiven* oder *Wechselstromwiderstand* der Spule dar. Er läßt sich auf folgende Weise bestimmen:

(1) Beim Spannungsmaximum ($u = U_o$) fließt kein Strom. Das heißt, U_o und $U_{ind} = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$ müssen gegengleich sein: $U_o = -U_{ind} = L\frac{\Delta i}{\Delta t}$

(2) Da für kleine Winkel die Beziehung $\sin\varphi \approx \varphi$ gilt, können wir die Gleichung $i = I_o \sin\omega t$ vereinfachen: $i = I_o\,\omega\,t$. Entsprechend gilt für Δi:
$\Delta i = I_o\,\omega \cdot \Delta t$

(1), (2) $U_o = L\frac{I_o\,\omega\,\Delta t}{\Delta t} = \omega L I_o$

$$X_L = \frac{U_o}{I_o} = \omega L$$

Induktiver Blindwiderstand oder Wechselstromwiderstand einer idealen Spule: $X_L = \omega L$
Der induktive Widerstand ist proportional zu Induktivität und – aufgrund der Beziehung $\omega = 2\pi f$ – auch zur Frequenz.

Beispiel A

a) Welchen Wechselstromwiderstand besitzt eine ideale Spule mit einer Induktivität von 4 mH bei 50 Hz, welche bei 1000 Hz? Wie groß sind die Stromstärken, wenn die Spannung 6 V beträgt?

50 Hz:

$$X_L = \omega L = 2\pi \cdot 50\,\frac{1}{s} \cdot 0{,}004\ \text{H} = 1{,}26\ \Omega$$

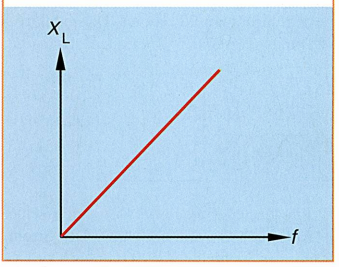
$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{6\ \text{V}}{1{,}26\ \Omega} = 4{,}77\ \text{A}$$

1000 Hz:

$$X_L = 2\pi \cdot 1000\,\frac{1}{s} \cdot 0{,}004\ \text{H} = 25{,}1\ \Omega$$

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{6\ \text{V}}{25{,}1\ \Omega} = 0{,}239\ \text{A}$$

b) Erstelle das X_L-f-Diagramm dieser Spule!



Versuch

Eine Spule wird über ein Amperemeter an einen Frequenzgenerator angeschlossen. Wird die Frequenz erhöht, sinkt die Stromstärke ab.

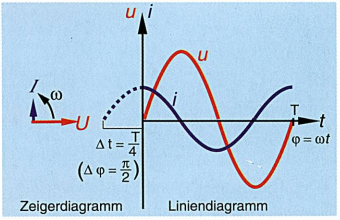
Idealer Kondensator im Wechselstromkreis

Versuch

Ein Kondensator wird über ein Amperemeter zuerst an eine Gleichspannung und dann an eine Wechselspannung angeschlossen. Für Gleichstrom stellt der Kondensator eine Unterbrechung dar. Es fließt kein Strom. Bei Wechselstrom zeigt das Amperemeter ständig einen Ausschlag.

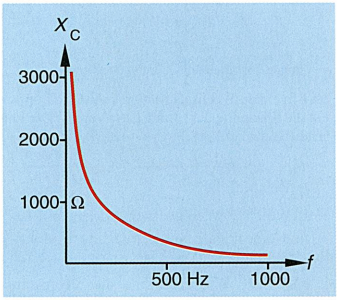
Im Augenblick des Einschaltens ist der Ladestrom ein Maximum. Mit dem Ansteigen der Wechselspannung wird der Ladestrom immer kleiner. Hat die angelegte Spannung ihren Maximalwert erreicht, dann ist der Ladestrom auf Null gesunken. Sinkt die Spannung ab, dann steigt der Ladestrom wieder an. Er erreicht sein Maximum, wenn die Spannung wieder Null ist. Im Wechselstromkreis wird ein Kondensator ständig aufgeladen und entladen. Dadurch fließt in den Leitungen Strom, obwohl der Kondensator eine Unterbrechung darstellt.

Ein Kondensator sperrt Gleichstrom und läßt Wechselstrom durch. In einem idealen Kondensator eilt der Strom der Spannung um $90^\circ (\frac{\pi}{2})$ voraus.



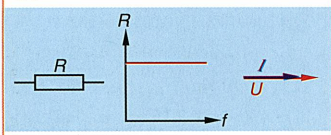
69.2 In einem Wechselstromkreis mit idealem Kondensator eilt die Stromstärke der Spannung voraus. Die Phasendifferenz beträgt 90°.

f in Hz	50	100	300	500	700	900	1000
X_C in Ω	3183	1591	531	318	227	177	159

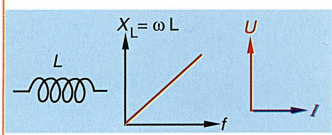


70.1 Wertetabelle und X_C-f-Diagramm eines Kondensators (zu Beispiel B)

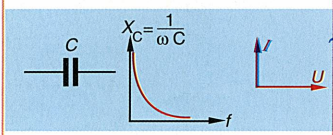
Ein *Ohmscher Widerstand* ist durch seinen *Widerstandswert R* gekennzeichnet. Spannung und Stromstärke sind in Phase. Der Widerstand R ist frequenzunabhängig.



Eine ideale *Spule* ist durch ihre *Induktivität L* gekennzeichnet. Die Spannung eilt dem Strom um 90° voras. Der induktive Blindwiderstand X_L ist frequenzabhängig.



Ein idealer *Kondensator* ist durch seine *Kapazität C* gekennzeichnet. Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus. Der kapazitive *Blindwiderstand* X_C ist frequenzabhängig.



Man bezeichnet X_L und X_C als *Blindwiderstände*, weil der elektrische Strom an diesen Widerständen im Mittel keine Arbeit verrichtet (Näheres dazu in Kap. 5.4).

Kapazitiver Widerstand

In einem Wechselstromkreis mit idealem Kondensator stellt das Verhältnis $\frac{U_o}{I_o} = X_C$ den *kapazitiven* oder *Wechselstromwiderstand* des Kondensators dar. Er kann auf folgende Weise berechnet werden:

(1) Ist die Spannung Null, erreicht die Stromstärke $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ ihren Scheitelwert I_o: $I_o = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$

(2) Aus der Kondensatorgleichung folgt:

$$Q = C\,U = C\,U_o \sin \omega t \approx C\,U_o\,\omega\,t \;\Rightarrow\; \Delta Q = C\,U_o\,\omega\,\Delta t$$

(1), (2) $I_o = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C\,U_o\,\omega$

$$X_C = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\omega\,C\,U_o} = \frac{1}{\omega\,C}$$

Kapazitiver Blindwiderstand oder *Wechselstromwiderstand eines idealen Kondensators*

$$X_C = \frac{1}{\omega\,C}$$

Der kapazitive Widerstand ist verkehrt proportional zur Kapazität und zur Frequenz.

Versuch

Ein Kondensator wird über ein Amperemeter an einen Frequenzgenerator angeschlossen. Bei Frequenzerhöhung steigt die Stromstärke an.

Beispiel B

a) Welchen Wechselstromwiderstand besitzt ein Kondensator von 1 µF bei 50 Hz, welchen bei 1000 Hz? Wie groß sind die Stromstärken bei einer Spannung von 12 V?

50 Hz: $X_C = \frac{1}{\omega\,C} = \frac{1}{2\,\pi \cdot 50\,\frac{1}{s} \cdot 1 \cdot 10^{-6}\,F} = 3183\,\Omega$

$I = \frac{U}{X_C} = \frac{12\,V}{3183\,\Omega} = 3{,}8\,mA$

1000 Hz: $X_C = \frac{1}{\omega\,C} = \frac{1}{2\,\pi \cdot 1000\,\frac{1}{s} \cdot 1 \cdot 10^{-6}\,F} = 159{,}2\,\Omega$

$I = \frac{U}{X_C} = \frac{12\,V}{159{,}2\,\Omega} = 75\,mA$

b) Erstelle das X_C-f-Diagramm dieses Kondensators (Abb. 70.1).

Aufgaben

96. Eine Luftspule wird über ein Amperemeter an eine Wechselspannung angeschlossen. Wie ändert sich die Stromstärke, wenn in die Luftspule ein Eisenkern eingeschoben wird?

97. Eine ideale Spule wird an eine Wechselspannung von 24 V gelegt. Das Amperemeter zeigt 0,8 A. Berechne den induktiven Blindwiderstand und die Induktivität der Spule.

98. Ein idealer Kondensator wird an eine Wechselspannung von 60 V angeschlossen. Ein Amperemeter zeigt 113 mA. Berechne den kapazitiven Blindwiderstand und die Kapazität des Kondensators.

5.3 Wechselstromkreis mit verschiedenen Bauelementen

Reihenschaltung von Widerstand und idealer Spule

Bei einer Reihenschaltung von Bauelementen ist die Stromstärke überall gleich groß. Daher werden im Zeigerdiagramm die Spannungszeiger auf den Zeiger der Stromstärke bezogen. Der Ohmsche Widerstand verursacht einen Spannungsabfall $U_R = I\,R$, der phasengleich zum Strom I ist. Am induktiven Blindwiderstand tritt die Spannung $U_L = I\,X_L$ auf, die dem Strom um 90° voreilt (Abb. 71.2 links). Zwischen den beiden Spannungen herrscht eine Phasendifferenz, ihre Zeiger sind daher nicht parallel. Die Spannungsbeträge dürfen deswegen nicht addiert werden. Die Gesamtspannung U erhält man durch Addition der Zeiger (Abb. 71.2 rechts). Zu diesem Zweck wird der Zeiger U_L an die Spitze des Zeigers U_R gesetzt und liefert damit den Zeiger U. Im rechtwinkeligen Dreieck ergibt sich für die Gesamtspannung U:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

Das Zeigerdiagramm zeigt auch, daß zwischen Gesamtspannung U und Stromstärke I eine Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ auftritt.

Auch mit den Widerständen kann ein Zeigerdiagramm gezeichnet werden. Die Widerstandszeiger haben die gleichen Richtungen wie die entsprechenden Spannungszeiger. Ihre Längen stehen im gleichen Verhältnis wie die der Spannungszeiger. Der Gesamtwiderstand wird als *Scheinwiderstand* oder *Impedanz* Z bezeichnet (Abb. 71.3 links).

Auch für den Wechselstromkreis gilt das Ohmsche Gesetz: $U = Z\,I$

Aus dem Widerstandsdiagramm (Abb. 71.3 rechts) ergibt sich für den Scheinwiderstand Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega\,L)^2}$$

Die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ zwischen Strom und Spannung läßt sich aus dem Widerstands- oder Spannungsdiagramm berechnen:

$$\tan\Delta\varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{U_L}{U_R} \quad \Leftrightarrow \quad \Delta\varphi = \text{arc tan}\,\frac{X_L}{R} = \text{arc tan}\,\frac{U_L}{U_R}$$

➤ Beispiel A

Eine ideale Spule mit einer Induktivität von 0,4 H und ein Widerstand von 50 Ω sind in Reihe geschaltet.

a) Wie groß ist der Blindwiderstand X_L der Spule, wenn die Frequenz des Wechselstromes 50 Hz beträgt?

$$X_L = \omega\,L = 2\,\pi \cdot 50\,\frac{1}{s} \cdot 0{,}4\ \text{H} = 125{,}7\ \Omega$$

b) Wie groß ist der Scheinwiderstand Z der Reihenschaltung?

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega\,L)^2} = \sqrt{50^2 + 125{,}7^2}\ \Omega = 135{,}3\ \Omega$$

c) Wie groß ist die effektive Stromstärke, wenn die effektive Spannung 220 V beträgt?

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\ \text{V}}{135{,}3\ \text{A}} = 1{,}63\ \text{A}$$

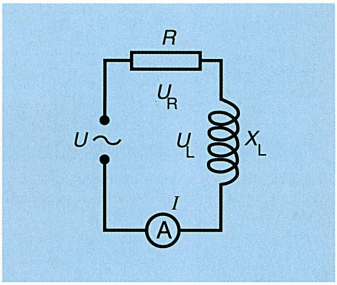
d) Wie groß ist die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung?

$$\Delta\varphi = \text{arc tan}\,\frac{\omega\,L}{R} = \text{arc tan}\,\frac{125{,}7\ \Omega}{50\ \Omega} = 68{,}3^o$$

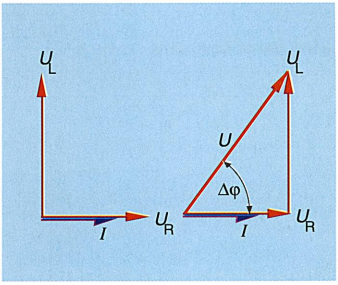
e) Wie groß sind die Spannungsabfälle U_R und U_L?

$$U_R = I\,R = 1{,}63\ \text{A} \cdot 50\ \Omega = 81{,}5\ \text{V}$$

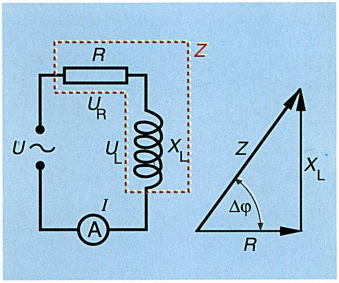
$$U_L = I\,X_L = 1{,}63\ \text{A} \cdot 125{,}7\ \Omega = 204{,}9\ \text{V}$$



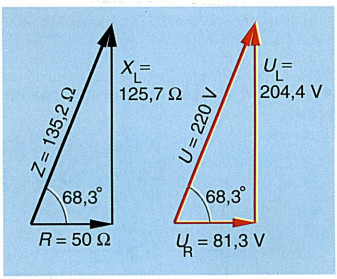
71.1 Reihenschaltung von Ohmschem Widerstand und idealer Spule. Für die Momentanwerte der Spannungen gilt das zweite Kirchhoffsche Gesetz: $u = u_R + u_L = RI_o \cdot sin\omega t + \omega LI_o \cdot cos\omega t$



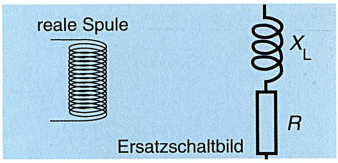
71.2 *Links:* Zwischen U_L und U_R herrscht eine Phasendifferenz von 90°. *Rechts:* Man erhält die Gesamtspannung U durch Zeigeraddition von U_R und U_L.



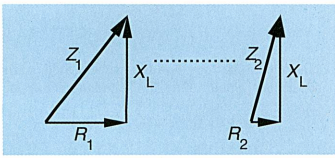
71.3 *Links:* Gesamtwiderstand Z, *rechts:* Man erhält Z durch Zeigeraddition von R und X_L.



71.4 Zeigerdiagramme zu Beispiel A

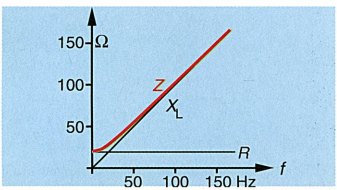


72.1 Eine reale Spule denkt man sich als Reihenschaltung von Ohmschem Widerstand und idealer Spule.

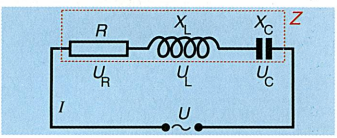


72.2 Je kleiner der Ohmsche Widerstand ist, umso mehr nähert sich die reale der idealen Spule.

f	Z	X_L
0	13,50	0,00
10	20,24	15,08
20	33,04	30,16
30	47,21	45,24
40	61,81	60,32
50	76,60	75,40
60	91,48	90,48
70	106,42	105,56
80	121,39	120,64
90	136,39	135,72
100	151,40	150,80
110	166,42	165,88
120	181,46	180,96
130	196,50	196,04
140	211,55	211,12
150	226,60	226,19
160	241,65	241,27
170	256,71	256,35
180	271,77	271,43
190	286,83	286,51
200	301,89	301,59



72.3 Frequenzabhängigkeit der Spulenwiderstände. Eine Spule mit einer Induktivität von 0,24 H besitzt einen Ohmschen Widerstand von 13,5 Ω. Die Tabelle zeigt induktiven Blindwiderstand und Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz. Im Bild ist der Verlauf der einzelnen Widerstände dargestellt.



72.4 Reihenschaltung von Widerstand, Spule und Kondensator

Reale Spule

Jede Spule besitzt einen Ohmschen Widerstand (Drahtwiderstand). Diesen hat man sich mit dem induktiven Blindwiderstand in Reihe geschaltet zu denken. Daher läßt sich die reale Spule wie eine Reihenschaltung aus Ohmschem Widerstand und idealer Spule behandeln (Abb. 72.1). Wie das Widerstandszeigerdiagramm zeigt, ist der Ohmsche Widerstand die Ursache dafür, daß die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung kleiner als 90° wird. Je kleiner der Ohmsche Widerstand der Spule ist, desto mehr nähert sich die Phasendifferenz dem Wert von 90°, und desto eher kann die Spule als ideal betrachtet werden (Abb. 72.2).

➤ **Beispiel B:** *Bestimmumg der Induktivität L einer Spule*

Die Stromaufnahme einer Spule wird bei Gleich- und Wechselspannung von 10 V gemessen. Bei Gleichspannung beträgt die Stromstärke I = 0,86 A, bei Wechselspannung I^* = 0,014 A.

(1) $L = \frac{X_L}{\omega}$ (2) $Z^2 = R^2 + X_L^2 \Leftrightarrow X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$

(3) $Z = \frac{U}{I^*} = \frac{10\text{ V}}{0{,}014\text{ A}} = 714{,}29\ \Omega$ (4) $R = \frac{U}{I} = \frac{10\text{ V}}{0{,}86\text{ A}} = 11{,}63\ \Omega$

(1), (2), (3), (4) $L = \frac{\sqrt{714{,}29^2 - 11{,}63^2}}{2\pi \cdot 50}\text{ H} = 2{,}27\text{ H}$

Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand

R kann ein in Reihe geschalteter Widerstand oder der Ohmsche Widerstand der Spule sein. Die Stromstärke ist überall gleich groß, daher werden die Spannungszeiger auf den Stromzeiger bezogen.

Die Spannung am Ohmschen Widerstand $U_R = I\,R$ ist phasengleich mit dem Strom I. Die Spannung am induktiven Widerstand $U_L = I\,X_L$ eilt dem Strom um 90° voraus. Am kapazitiven Blindwiderstand tritt die Spannung $U_C = I\,X_C$ auf, die dem Strom um 90° nachhinkt (Abb. 73.1). Aus dem Spannungszeiger-Diagramm ergibt sich:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Mit $U_R = R\,I$, $U_L = X_L\,I$, $U_C = X_C\,I$ erhält man

$$U = \sqrt{R^2 I^2 + (X_L I - X_C I)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Da $\frac{U}{I} = Z$ ist, ergibt sich für den Scheinwiderstand Z:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Damit läßt sich auch das entsprechende Widerstandszeiger-Diagramm zeichnen.

Scheinwiderstand Z eines Wechselstromkreises bei Reihenschaltung von Widerstand, Spule und Kondensator

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$$

Versuch

Die Reihenschaltung (Abb. 73.2) wird über ein Amperemeter an einen Frequenzgenerator angeschlossen. Für die angegebenen Werte wird die Frequenz etwa von 30 bis 60 Hz geändert. Bei ca. 40 Hz zeigt das Amperemeter ein Strommaximum. Werden bei dieser Frequenz, der sogenannten *Resonanzfrequenz* f_0, die Spannungen an Spule und Kondensator gemessen, dann zeigt sich ein überraschendes Ergebnis: Die beiden Spannungen sind einerseits betragsgleich, andererseits beträchtlich höher als die angelegte Spannung!

Da U_L und U_C betragsgleich sind, gilt dies auch für X_L und X_C:

$\omega_o L = \frac{1}{\omega_o C} \Leftrightarrow \omega_o = \sqrt{\frac{1}{L\,C}}$ Daraus und aus $\omega_o = 2\,\pi\,f_o$ folgt:

$$f_o = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L\,C}}$$

Resonanzfrequenz (Thomsonsche Gleichung) $f_o = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L\,C}}$

Der Scheinwiderstand besitzt bei der Resonanzfrequenz wegen $X_L = X_C$ einen minimalen Wert. Er ist gleich dem Ohmschen Widerstand: $Z = R$. Das Minimum des Scheinwiderstandes bei der Resonanzfrequenz bedingt nach $I = U/Z$ ein Strommaximum.

An Spule und Kondensator treten Spannungen auf, die wesentlich höher sein können als die angelegete Spannung. Man spricht von Spannungserhöhung. Dies kann zu einer Gefährdung der Bauelemente führen.

Bei einer Reihenschaltung von Spule und Kondensator tritt bei der Resonanzfrequenz *Reihenresonanz* oder *Spannungsresonanz* auf. Dabei heben sich die Blindwiderstände in ihrer Wirkung auf. Die Schaltung verhält sich wie ein Ohmscher Widerstand. Die Spannungen an Spule und Kondensator können sehr hohe Werte erreichen.

Beispiel C: *Frequenzverhalten der LCR-Reihenschaltung*

Für die im letzten Versuch verwendeten Bauelemente ergibt sich die Resonanzfrequenz

$$f_o = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{L\,C}} = \frac{1}{2\,\pi\,\sqrt{2{,}27\ \text{H} \cdot 6 \cdot 10^{-6}\ \text{F}}} = 43{,}1\ \text{Hz}$$

Abb. 73.3 zeigt den Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz.

Eine Reihenschaltung aus Spule und Kondensator wird auch als *Siebkette* bezeichnet. Sie läßt die Resonanzfrequenz bevorzugt durch.

Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand

Bei der Parallelschaltung liegt an allen Bauelementen dieselbe Spannung U. Daher ist der Spannungszeiger die Bezugsrichtung im Zeigerdiagramm. Der Strom durch den Ohmschen Widerstand ist phasengleich mit der Spannung U. Der Strom im Kondensatorzweig eilt der Spannung um 90° voraus. Der Spulenstrom hinkt um 90° nach (Abb. 73.4).

Aus dem Zeigerdiagramm folgt: $I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$

Mit $I_R = \frac{U}{R}$, $I_L = \frac{U}{X_L}$, $I_C = \frac{U}{X_C}$ erhält man

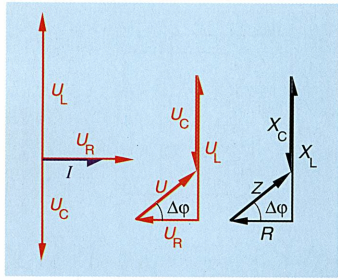
$$I = \sqrt{(\frac{U}{R})^2 + (\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L})^2} = U\sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2}$$

Da $\frac{I}{U} = \frac{1}{Z}$, ergibt sich für den Reziprokwert $\frac{1}{Z}$ des Scheinwiderstandes:

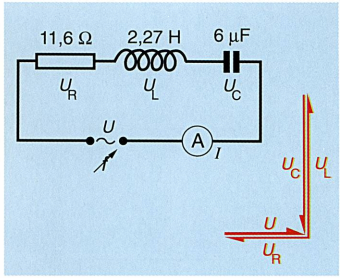
$$\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2}$$

Damit läßt sich auch das entsprechende Widerstandszeiger-Diagramm zeichnen.

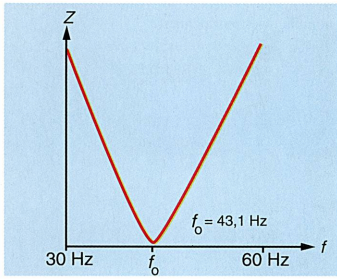
Scheinwiderstand Z bei Parallelschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule $\frac{1}{Z} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L})^2}$



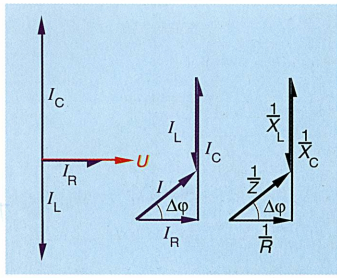
73.1 Zeigerdiagramme zur Reihenschaltung von Widerstand, Spule und Kondensator



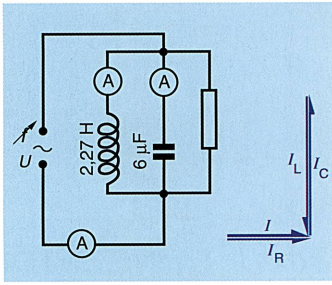
73.2 Bei der Resonanzfrequenz f_o erhält man ein Strommaximum. U_L und U_C sind betragsgleich.



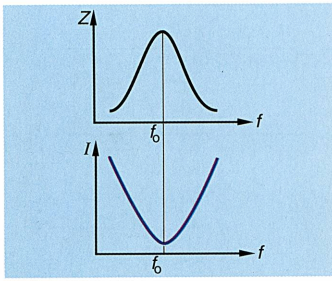
73.3 Abbildung zu Beispiel C: Der Scheinwiderstand Z in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Resonanzfrequenz f_o ist durch das Widerstandsminimum gekennzeichnet.



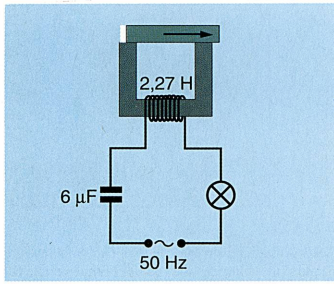
73.4 Zeigerdiagramme zur Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand



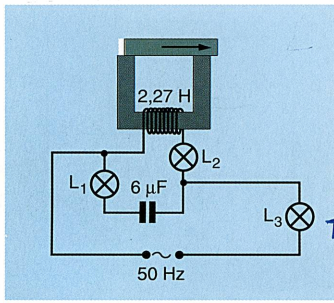
74.1 Bei der Resonanzfrequenz f_o erhält man ein Stromminimum. I_L und I_C sind betragsgleich.



74.2 Scheinwiderstand und Stromstärke in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Resonanzfrequenz f_o ist durch ein Widerstandsmaximum und ein Stromminimum gekennzeichnet.



74.3 Abbildung zu Aufgabe 105



74.4 Abbildung zu Aufgabe 106

Versuch

Die Parallelschaltung (Abb. 74.1) wird über ein Amperemeter an einen Frequenzgenerator angeschlossen. Für die angegebenen Werte wird die Frequenz etwa von 30 bis 60 Hz verändert. Bei ca. 40 Hz zeigt das Amperemeter ein Stromminimum. Werden bei dieser Frequenz die Stromstärken im Spulen- und Kondensatorzweig gemessen, findet man ein überraschendes Ergebnis: Die beiden Stromstärken sind einerseits betragsgleich und andererseits größer als die Gesamtstromstärke!

Aus $I_L = I_C$ folgt $X_L = X_C$. Damit sind dieselben Resonanzbedingungen wie bei der Reihenschaltung gegeben:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Der Scheinwiderstand besitzt bei der Resonanzfrequenz einen maximalen Wert, er ist gleich dem Ohmschen Widerstand: $Z = R$.

Abb. 74.2 oben zeigt den Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz. Das Maximum des Scheinwiderstandes bei der Resonanzfrequenz bedingt ein Minimum der Stromstärke (Abb. 74.2 unten). Die beiden Ströme I_L und I_C heben einander auf. Im Spulen- und Kondensatorzweig können die Stromstärken aber wesentlich höher sein als in der Zuleitung zur Stromquelle. Man spricht von einer Stromerhöhung.

Bei der Parallelschaltung von Spule und Kondensator tritt bei der Resonanzfrequenz *Parallelresonanz* oder *Stromresonanz* auf. Dabei heben sich die Blindwiderstände in ihrer Wirkung auf. Die Schaltung verhält sich wie ein Ohmscher Widerstand. Die Stromstärken im Spulen- und Kondensatorzweig können aber sehr hohe Werte erreichen.

Eine Parallelschaltung aus Spule und Kondensator wird auch als *Sperrkreis* bezeichnet. Er unterdrückt die Resonanzfrequenz.

Aufgaben

99. Eine Spule besitzt eine Induktivität von 150 mH und einen Widerstand von 9,91 Ω. Bei welcher Frequenz besteht zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 84°?

T **100.** Ein Widerstand von 13,5 Ω ist mit einem Kondensator von 6 µF in Serie geschaltet. a) Zeichne die Zeigerdiagramme für Spannung und Widerstand. b) Berechne den Scheinwiderstand in Abhängigkeit von der Frequenz im Bereich von 10 Hz bis 100 kHz (Wertetabelle). c) Stelle die Abhängigkeit des Scheinwiderstandes von der Frequenz grafisch dar (logarithmische Skala für Z und f).

T **101.** Eine Spule ist mit einem Widerstand in Serie geschaltet. Wie ändert sich die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, wenn der Widerstand vergrößert wird?

102. Wird an eine Spule (90 mH) eine Wechselspannung (12 V, 50 Hz) gelegt, so zeigt das Amperemeter 0,41 A an. Welche Stromstärke wäre bei 12 V Gleichspannung vorhanden?

103. An eine Reihenschaltung von Spule (1,69 H), Kondensator (6 µF) und Widerstand (20 Ω) wird eine Spannung von 12 V/50 Hz angelegt. Wie groß sind die Spannungen an Spule, Kondensator und Widerstand?

104. Welche Induktivität muß eine Spule haben, damit bei der Serien- oder Parallelschaltung eines Kondensators (10 µF) bei der Netzfrequenz Resonanz auftritt?

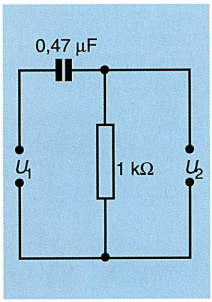
T **105.** Eine Reihenschaltung aus Spule (mit geschlossenem Eisenkern) und Kondensator besitzt eine Resonanzfrequenz von 43 Hz. Wird die Schaltung an 50 Hz angeschlossen, dann leuchtet die Lampe schwach (Abb. 74.3). a) Warum leuchtet die Lampe hell, wenn der Anker teilweise weggezogen wird? b) Warum erlischt die Lampe, wenn der Anker ganz weggezogen wird?

106. Die Parallelschaltung aus Spule (mit geschlossenem Eisenkern) und Kondensator besitzt eine Resonanzfrequenz von 43 Hz. Wird die Schaltung an 50 Hz angeschlossen, dann kann durch Verschieben des Ankers Resonanz eingestellt werden (Abb. 74.4). Was kann in diesem Fall über das Leuchten der einzelnen Lämpchen gesagt werden?

107. Eine Spule (0,675 H), ein Kondensator (6 µF) und ein Widerstand (25 Ω) sind in Reihe geschaltet. a) Welche Stromstärke ist bei 24 V/50 Hz vorhanden? b) Welche Kapazität müßte der Kondensator haben, damit die Stromstärke ein Maximum erreicht? Wie groß ist dieses Maximum?

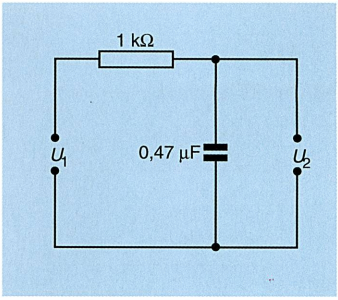
108. An die Schaltung in Abb. 75.1 wurde eine Spannung von $U_1 = 6$ V eines Frequenzgenerators angelegt. Die Tabelle zeigt die gemessene Spannung U_2 in Abhängigkeit von der Frequenz. a) Stelle das Verhältnis U_2/U_1 in Abhängigkeit von der Frequenz grafisch dar (Frequenzkurve). Verwende für die Frequenz eine logarithmische Skala. b) Warum bezeichnet man diese Schaltung als Hochpaß? c) Berechne das Spannungsverhältnis in Abhängigkeit von der Frequenz mit Hilfe eines Computerprogramms (Tabelle). d) Stelle die berechnete Frequenzkurve mit Hilfe eines Grafikprogramms dar und vergleiche mit der gemessenen Kurve.

109. a) Berechne für die Schaltung in Abb. 75.2 das Spannungsverhältnis U_2/U_1 im Frequenzbereich 10 Hz bis 2000 Hz mit Hilfe eines Computerprogramms. b) Stelle die Frequenzkurve grafisch dar. c) Warum bezeichnet man diese Schaltung als Tiefpaß?



f (Hz)	U_2 (V)
10	0,10
20	0,30
40	0,55
60	0,75
80	1,00
100	1,20
200	2,20
400	3,75
600	4,55
800	4,95
1000	5,20
2000	5,60

75.1 Abbildung zu Aufgabe 108



75.2 Abbildung zu Aufgabe 109

5.4 Leitung im Wechselstromkreis

Ohmscher Widerstand als Verbraucher

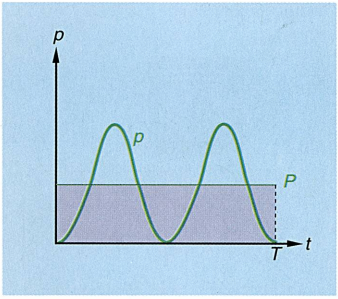
Diese Fall wurde bereits in Kap. 5.2 besprochen. Da er den Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen darstellt, werden die Ergebnisse nochmals zusammengefaßt.

Strom und Spannung sind in Phase: $u = U_o \sin \omega t$, $i = I_o \sin \omega t$

Momentanleistung (Abb. 75.3): $p = U_o I_o \sin^2 \omega t$

Effektivwerte: $I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_o}{\sqrt{2}}$

Die Leistung wird am Widerstand "wirklich" verbraucht, nämlich in Wärme umgewandelt. Sie wird als *Wirkleistung P* bezeichnet. $P = U\,I$
Entsprechen die Effektivwerte eines Wechselstromkreises den Werten eines Gleichstromkreises, dann vollbringen beide gleiche Leistungen.
Den Ohmschen Widerstand bezeichnet man auch als *Wirkwiderstand* und den Strom als *Wirkstrom*.



75.3 Momentane Leistung p und Wirkleistung P am Ohmschen Widerstand

Beispiel A

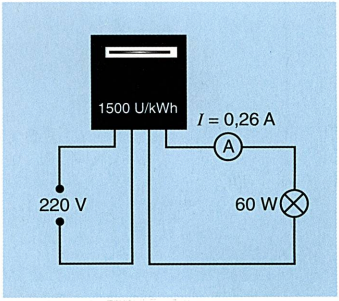
Eine 60-W-Lampe wird über ein Amperemeter und einen Zähler an das Netz angeschlossen. Die Alu-Scheibe des Zählers dreht sich und zeigt damit an, daß auch "wirklich" elektrische Energie verbraucht wird, d. h. zur Lampe übertragen wird (Abb. 75.4).

Meßergebnis: Die Zählerscheibe benötigt für eine Umdrehung 37 s.
Die Zählerkonstante (1500 U/kWh) gibt an, wie viele Umdrehungen die Scheibe bei 1 kWh durchführt.

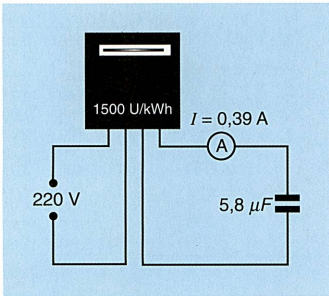
Wie groß ist die Leistungsaufnahme des Stromkreises wirklich?

Übertragene Energie (für eine Umdrehung) = $1\,\frac{\text{kWh}}{1500}$

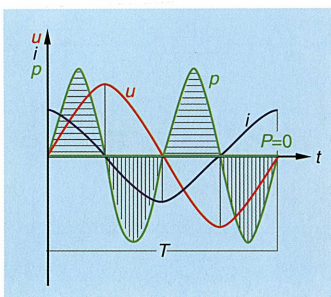
$$P = \frac{W}{t} = \frac{1\ \text{kWh}}{1500 \cdot \frac{37}{3600}\ \text{h}} \approx 65\ \text{W}$$



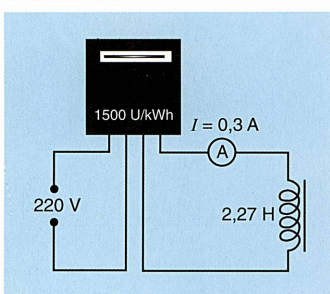
75.4 Abbildung zu Beispiel A



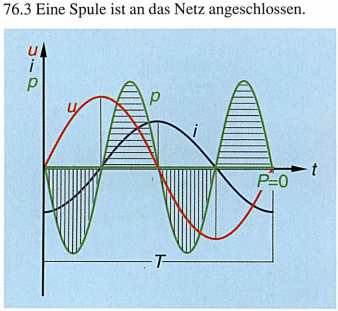
76.1 Ein Kondensator ist an das Netz angeschlossen.



76.2 Momentane Leistung und Wirkleistung am idealen Kondensator



76.3 Eine Spule ist an das Netz angeschlossen.



76.4 Momentane Leistung und Wirkleistung an der idealen Spule

Idealer Kondensator als Verbraucher

Versuch

Ein Kondensator (5,8 µF) wird über ein Amperemeter und einen Zähler an das Netz angeschlossen (Abb. 76.1). Die Scheibe des Zählers dreht sich nicht, obwohl das Amperemeter eine größere Stromstärke (0,39 A) anzeigt als vergleichsweise beim Anschluß einer 60-W-Lampe. Der Zähler ist für diesen Strom "blind". Daher wird der Strom auch als *Blindstrom* und der Widerstand des Kondensators als *Blindwiderstand* bezeichnet.

Bei einem idealen Kondensator eilt der Strom der Spannung um 90° voraus.
$i = I_o \cos \omega t \quad u = U_o \sin \omega t$

Um zu verstehen, warum der Zähler keine Energieübertragung anzeigt, obwohl Strom fließt, muß die momentane Leistung p betrachtet werden.

$$p = U_o I_o \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{U_o I_o}{2} \sin 2 \omega t$$

(Die Umformung erfolgte nach der Formel $\sin 2 \varphi = 2 \sin \varphi \cos \varphi$. Die Funktion $\sin 2 \varphi$ hat die halbe Periodenlänge der Funktion $\sin \varphi$.)

Die Kurve für die momentane Leistung zeigt, daß gleich große positive und negative Anteile auftreten (Abb. 76.2). Ist die momentane Leistung positiv, dann wird dem Kondensator von der Stromquelle Energie zugeführt und im Kondensator gespeichert. Ist die momentane Leistung negativ, dann liefert der Kondensator Energie an die Stromquelle zurück.

Beim idealen Kondensator "pendelt" die Energie zwischen Stromquelle und Kondensator hin und her. Die Energie wird nicht "wirklich" verbraucht. Die Wirkleistung ist Null.

Es findet keine Erwärmung statt. Die Scheibe des Zählers dreht sich nur dann, wenn auch Wirkleistung auftritt.

Ideale Spule als Verbraucher

Versuch

Eine Spule (2,27 H) wird über ein Amperemeter und einen Zähler an das Netz angeschlossen (Abb. 76.3). Die Scheibe des Zählers dreht sich äußerst langsam. Der Zähler ist für den Spulenstrom praktisch "blind". Ähnlich wie beim Kondensator wird der Spulenstrom als *Blindstrom* und der induktive Widerstand der Spule als *Blindwiderstand* bezeichnet. Die verwendete Spule besitzt eine große Induktivität und einen geringen Ohmschen Widerstand. Daher verhält sie sich praktisch wie eine ideale Spule und stellt einen reinen Blindwiderstand dar. Bei einer idealen Spule eilt die Spannung dem Strom um 90° voraus.
$u = U_o \cos \omega t, \quad i = I_o \sin \omega t$

Für die momentane Leistung gilt wieder:

$$p = U_o I_o \sin \omega t \cos \omega t = \frac{U_o I_o}{2} \sin 2 \omega t$$

Der Verlauf der momentanen Leistung zeigt – wie beim idealen Kondensator – gleich große positive und negative Anteile (Abb. 76.4).

Bei einer idealen Spule "pendelt" die Energie zwischen Stromquelle und Spule hin und her. Energie wird nicht "wirklich" verbraucht. Die Wirkleistung ist Null.

Eine ideale Spule würde sich auch nicht erwärmen.

Reale Spule als Verbraucher

Reale Spulen (Motor, Transformator) besitzen neben ihrem Blindwiderstand auch einen Wirkwiderstand. Daher ist die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung kleiner als 90°.

In Abb. 77.1 ist der Verlauf von Spannung, Strom und Leistung für eine Phasenverschiebung von 45° dargestellt.

Die Kurve für die momentane Leistung zeigt, daß die positiven Anteile überwiegen. Es tritt eine positive Wirkleistung auf. Zum Liniendiagramm läßt sich auch ein Spannungszeiger-Diagramm zeichnen (Abb. 77.2). Die reale Spule kann wie eine Reihenschaltung aus idealer Spule und Ohmschem Widerstand behandelt werden. Bei einer Reihenschaltung ist die Stromstärke überall gleich groß. Daher wird der Stromzeiger als Bezugszeiger gewählt. In den Leitungen fließt der Strom I, der auch von einem Amperemeter angezeigt wird. Er ergibt die Scheinleistung $P_s = U\,I$.

Die Projektion von U auf I ergibt den Spannungsabfall am Ohmschen Widerstand $U_R = U \cdot \cos\Delta\varphi$. U_R ist phasengleich mit I und wird als Wirkspannung bezeichnet. U_R und I ergeben die Wirkleistung $P = U_R \cdot I = U \cdot I \cdot \cos\Delta\varphi$.

Wirkleistung P

$$P = U\,I\cos\Delta\varphi$$

Die Wirkleistung bestimmt die "wirklich" zum Verbraucher übertragene Energie und führt auch zu einer Erwärmung des Verbrauchers.

Leistungsfaktor $\cos\Delta\varphi = \dfrac{P}{P_S}$

Der Leistungsfaktor gibt an, welcher Teil der zugeführten Scheinleistung im Verbraucher in Wirkleistung umgesetzt wird.

Am Typenschild eines Motors ist der Leistungsfaktor angegeben.

Beispiel B

Eine Reihenschaltung aus Spule (2,27 H) und Ohmschem Widerstand (320 Ω) wird über ein Amperemeter und einen Zähler an das Netz angeschlossen (Abb. 77.3).

Man liest am Amperemeter eine Stromstärke von $I = 0{,}15$ A ab. Die Zählerscheibe benötigt für 1 Umdrehung 110 s.

Zu bestimmen sind: Wirkleistung P, Scheinleistung P_S, Leistungsfaktor und Wirkspannung U_R.

Aus der Zählerablesung läßt sich die Wirkleistung P berechnen:

$$P = \frac{1\ \text{kWh}}{1500 \cdot \frac{110}{3600}\ \text{h}} = 0{,}0218\ \text{kW} = 21{,}8\ \text{W}$$

Scheinleistung P_S:

$P_S = U\,I = 220\ \text{V} \cdot 0{,}15\ \text{A} = 33\ \text{W}$

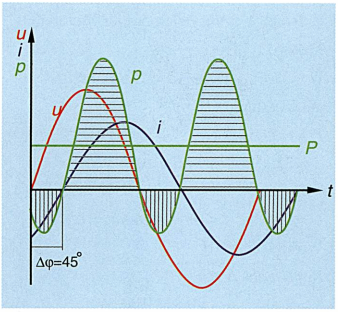
Leistungsfaktor:

$$\cos\Delta\varphi = \frac{P}{P_S} = \frac{21{,}8\ \text{W}}{33\ \text{W}} = 0{,}66$$

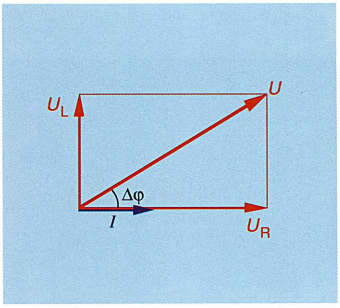
Wirkspannung U_R:

$U_R = U \cdot \cos\Delta\varphi = 220 \cdot 0{,}66\ \text{V} = 145{,}3\ \text{V}$

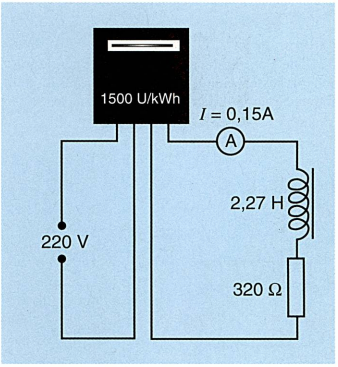
Nur die Wirkleistung ist nutzbringend. Ist $\cos\Delta\varphi < 1$, muß das E-Werk eine größere Leistung (P_S) zur Verfügung stellen, als die Wirkleistung beträgt. Der Leistungsfaktor eines Verbrauchers soll daher möglichst nahe bei 1 sein. In der Praxis ist es nötig, den Leistungsfaktor zu verbessern, d.h. zu erhöhen. Dies erreicht man etwa durch Hinzuschalten eines Kondensators. Dadurch kann die induktive Blindleistung durch die kapazitive Blindleistung teilweise kompensiert werden. Der Kondensator wirkt als *Phasenschieber*.



77.1 Der Strom hinkt der Spannung um 45° nach. Es tritt eine positive Wirkleistung auf.



77.2 Spannungszeiger-Diagramm



77.3 Abbildung zu Beispiel B

Nur Wirkwiderstand (Ohmscher Widerstand):

$\Delta\varphi = 0^\circ \Rightarrow \cos\Delta\varphi = 1$

Nur Blindwiderstand (induktiv oder kapazitiv):

$\Delta\varphi = 90^\circ \Rightarrow \cos\Delta\varphi = 0$

Wirkwiderstand + Blindwiderstand:

$0^\circ < \Delta\varphi < 90^\circ \Rightarrow 0 < \cos\Delta\varphi < 1$

Beispiel C: Vergleich zweier Motoren

Motor 1:

$U = 220\ \text{V},\quad I = 8\ \text{A},\quad \cos\Delta\varphi = 0{,}6$

Wirkleistung

$P = U\,I\cos\Delta\varphi =$

$= 220\ \text{V} \cdot 8\ \text{A} \cdot 0{,}6 = 1056\ \text{W}$

Motor 2:

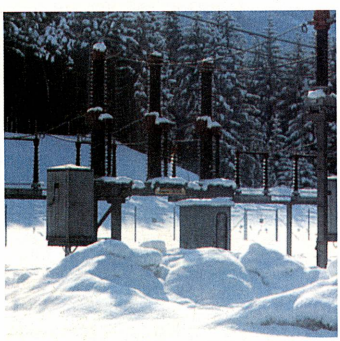
$U = 220\ \text{V},\quad I = 6\ \text{A},\quad \cos\Delta\varphi = 0{,}8$

Wirkleistung

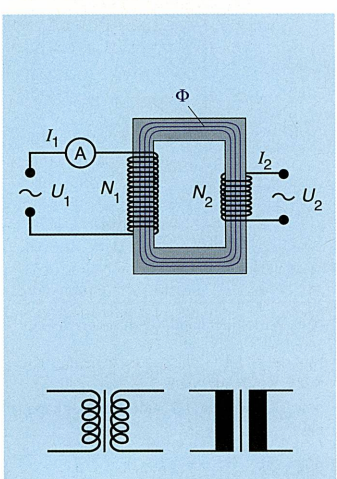
$P = U\,I\cos\Delta\varphi =$

$= 220\ \text{V} \cdot 6\ \text{A} \cdot 0{,}8 = 1056\ \text{W}$

Beide Motoren haben die gleiche Wirkleistung (Nutzleistung). Aber Motor 1 belastet das Stromnetz stärker als Motor 2.



78.1 Die Versorgung mit elektrischer Energie wäre ohne Transformatoren undenkbar. Das Bild stellt ein modernes Umspannwerk dar.



78.2 *Oben:* Schematische Darstellung eines Transformators, *unten:* Schaltzeichen für einen Transformator.

Aufgaben

110. Eine Spule mit einer Induktivität von 0,42 H und einem Ohmschen Widerstand von 10 Ω ist an die Netzspannung angeschlossen. Berechne Stromstärke, Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, Wirkleistung und Leistungsfaktor.

111. Ein Motor für 220 V hat eine Wirkleistung von 2 kW und einen Leistungsfaktor von 0,8. Berechne Scheinleistung und Stromstärke.

112. Ein Motor nimmt 10 A bei 220 V auf. Während eines zweistündigen Betriebes geht der Zähler von 3645 auf 3648 kWh. Berechne den Leistungsfaktor.

5.5 Transformator

Der Transformator besteht aus einem geschlossenen Eisenkern mit zwei getrennten Wicklungen (Spulen), die man Primär- und Sekundärwicklung nennt (Abb. 78.2).

Der Primärspule wird elektrische Energie zugeführt, der Sekundärspule wird elektrische Energie entnommen.

Unbelasteter Transformator

Wird an die Sekundärwicklung kein Verbraucher (Widerstand) angeschlossen, dann ist der Transformator *unbelastet.* Der Sekundärkreis ist offen, es fließt kein Sekundärstrom.

Versuch

Ein unbelasteter Transformator wird über ein Amperemeter an das Netz angeschlossen. Mit der gemessenen Stromstärke (I = 28 mA) läßt sich der Scheinwiderstand Z der Primärspule berechnen.

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220\ \text{V}}{0{,}028\ \text{A}} = 7857\ \Omega$$

Mit einem Ohmmeter wird der Ohmsche Widerstand der Primärwicklung gemessen: $R = 100\ \Omega$

Damit läßt sich der induktive Blindwiderstand X_L berechnen:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{7857^2 - 100^2}\ \Omega = 7856{,}5\ \Omega \qquad Z \approx X_L$$

Die Primärspule des Transformators verhält sich praktisch wie eine ideale Spule. Der gemessene Leerlaufstrom ist ein induktiver Blindstrom, der vom Zähler nicht registriert wird.

Ein idealer, unbelasteter Transformator nimmt nur Blindstrom auf.

Der Wechselstrom I verursacht einen zeitlich veränderlichen magnetischen Fluß Φ im Eisenkern. Dieser veränderliche Fluß induziert in der Primärspule eine Selbstinduktionsspannung (Gegenspannung) U_L:

$$U_L = -N_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Diese ist betragsgleich der angelegten Spannung U_1, ihr aber entgegengerichtet:

$$U_L = -U_1$$

Der veränderliche Fluß Φ induziert aber auch in der Sekundärspule eine Spannung U_2:

$$U_2 = -N_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Da die Beträge der Flußänderungen in beiden Spulen gleich sind, ergibt sich:

$$\left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \frac{U_1}{N_1} \quad \text{und} \quad \left|\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right| = \frac{U_2}{N_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}$$

Primär- und Sekundärspannung verhalten sich wie die entsprechenden Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Belasteter Transformator

Wird an die Sekundärspule ein Ohmscher Widerstand angeschlossen, dann fließt der Wirkstrom I_2 (Abb. 79.1). Dieser Strom erzeugt einen magnetischen Fluß, der den ursprüglich vorhandenen Fluß Φ schwächt. Die Primärspule nimmt nun den Wirkstrom I_1 auf, so daß sich wieder der ursprünglich vorhandene Fluß einstellt.

Die Sekundärspule wirkt über das Magnetfeld auf die Primärspule zurück und bewirkt die Primärstromaufnahme.

Der ideale Transformator nimmt primärseitig die Wirkleistung $U_1 \cdot I_1$ auf und gibt sekundärseitig eine gleich große Leistung $U_2 \cdot I_2$ ab: $U_1 I_1 = U_2 I_2$

Die Stromstärken verhalten sich umgekehrt wie die Spannungen und die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ist die Sekundärwindungszahl kleiner als die Primärwindungszahl, dann wird die Spannung "hinuntertransformiert". Die Primärstromstärke ist dann geringer als die Sekundärstromstärke. Im umgekehrten Fall wird die Spannung "hinauftransformiert", und die Sekundärstromstärke ist geringer als die Primärstromstärke.

Versuch

Die Sekundärspule des Transformators besitzt nur sehr wenige Windungen und daher nur eine kleine Spannung. Ihre Anschlußklemmen werden durch einen Nagel miteinander verbunden (kurzgeschlossen). Es fließt ein sehr hoher Sekundärstrom, der den Nagel zum Glühen und schließlich zum Schmelzen bringt (Abb. 79.2). Solche Transformatoren verwendet man als Schweißtransformatoren.

Alle elektronischen Geräte (Unterhaltungselektronik, Computer, ...) benötigen eine kleine Betriebsspannung, etwa zwischen 5 und 20 V. Diese wird durch einen Netztransformator geliefert.

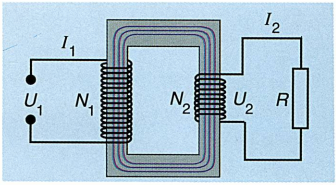
Ein idealer Transformator ermöglicht eine verlustlose Energieübertragung. Beim *realen* Transformator treten verschiedene Verluste auf: Kupferverluste (Ohmscher Widerstand der Wicklung), Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste, siehe Kap. 3.5), Wirbelstromverluste (siehe Kap. 4.6).
Die Verluste sind an einer Erwärmung des Transformators erkennbar.

In einem Transformator wird elektrische Energie vom Primärkreis über ein Magnetfeld auf den Sekundärkreis übertragen. Die beiden Stromkreise sind voneinander getrennt. Die Transformierbarkeit des Wechselstromes ist der Grund, weshalb das öffentliche Stromnetz mit Wechselstrom gespeist wird.

Bei der elektrischen Energieübertragung spielt die Transformation des Wechselstromes eine große Rolle, wie Beispiel C in der Randspalte zeigt.

Aufgaben

113. Die Primärseite eines Netztransformators wird über einen Schalter an eine Gleichspannung von 6 V angeschlossen. Was kann über die Anzeige des Voltmeters im Sekundärkreis gesagt werden, wenn der Primärstromkreis a) geschlossen wird, b) geschlossen bleibt, c) geöffnet wird?



79.1 Im Sekundärkreis fließt ein Wirkstrom.

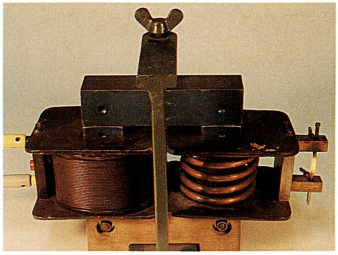
Beispiel A

Die Lampe eines Projektionsapparates benötigt eine Spannung von 24 V und nimmt 6 A auf. Wie groß muß das Übersetzungsverhältnis des Transformators sein, und wie groß ist die primärseitige Stromaufnahme?

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220\ \text{V}}{24\ \text{V}} \approx 9:1$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \Leftrightarrow I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1}$$

$$I_1 = 6\ \text{A}\ \frac{24\ \text{V}}{220\ \text{V}} = 0{,}65\ \text{A}$$



79.2 Der hohe Sekundärstrom bringt den Nagel zum Schmelzen.

Beispiel B

Die Übertragung einer Leistung von 11 MW über eine 220-V-Leitung würde eine Stromstärke von

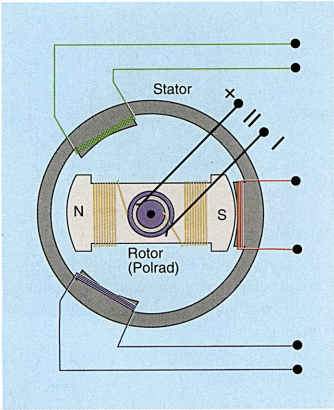
$$I = \frac{P}{U} = \frac{11 \cdot 10^6\ \text{W}}{220\ \text{V}} = 50\,000\ \text{A}$$

benötigen. Diese Stromstärke würde riesige Leitungsquerschnitte erfordern und einen enorm großen Leistungsverlust entlang der Leitung ergeben.

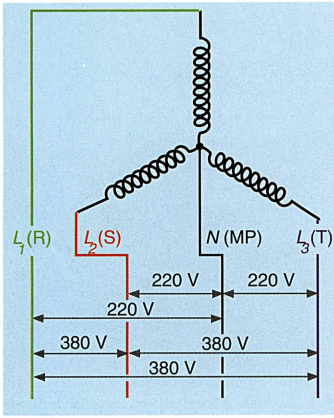
Bei einer 110 000-V-Leitung beträgt die Stromstärke nur noch

$$I = \frac{11 \cdot 10^6\ \text{W}}{11 \cdot 10^4\ \text{V}} = 100\ \text{A}$$

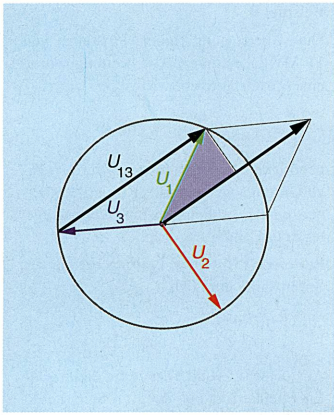
Aus diesem Grund erfolgt die elektrische Energieübertragung über größere Strecken durch Hochspannungsleitungen.



80.1 Schemabild eines Drehstromgenerators



80.2 Sternschaltung



80.3 Zeigerdiagramm der Sternspannung und der Spannung zwischen zwei Phasenleitern

114. An einen Transformator mit einer Sekundärspannung von 24 V werden drei 5-W-Lampen parallel angeschlossen. Wie groß ist der Primärstrom?

115. Ein Netztransformator besitzt primärseitig 500 Windungen, nimmt eine Leistung von 31 W auf und erzeugt eine Sekundärspannung von 6 V. Berechne Sekundärwindungszahl, Primär- und Sekundärstromstärke.

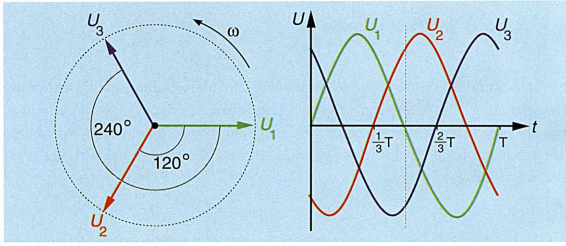
116. Über eine 110 000-V-Leitung aus Aluminium mit einem Querschnitt von 25 mm^2 werden 11 MW übertragen. Berechne Spannungsabfall und Leistungsverlust (in %) auf einer Strecke von 25 km. (Die Hin- und Rückleitung ergibt somit 50 km. Der spezifische Widerstand von Leitungsaluminium beträgt $0{,}0286 \cdot 10^{-6}$ Ωm.)

5.6 Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom)

Erzeugung von Dreiphasenwechselstrom

Wird eine Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld mit konstanter Winkelgeschwindigkeit gedreht, erhält man einen sinusförmigen Wechselstrom, den man auch *Einphasenwechselstrom* nennt. Einer 220-V- Steckdose kann man einen Einphasenwechselstrom entnehmen. Das öffentliche Stromnetz liefert jedoch einen *Dreiphasenwechselstrom.*

In Abb. 80.4 rotieren drei Leiterschleifen (Spulen), die um 120° gegeneinander versetzt sind, in einem homogenen Magnetfeld:



80.4 In jeder Leiterschleife wird eine sinusförmige Wechselspannung induziert. U_1, U_2 und U_3 sind gegeneinander um jeweils 120° phasenverschoben (Zeiger- und Liniendiagramm).

In jeder Leiterschleife wird eine sinusförmige Wechselspannung induziert. Die Spannungen in den drei Leiterschleifen erreichen allerdings zu verschiedenen Zeiten ihre Maximalwerte, sie sind um jeweils 120° gegeneinander phasenverschoben.

Beim *Drehstromgenerator* sind die drei Spulen (Induktionsspulen) fest eingebaut, und das Magnetfeld rotiert (Abb. 80.1).

Werden die Anschlüsse der drei Spulen zusammengeschaltet, dann werden die Spannungen miteinander *verkettet.* Man erhält einen *Dreiphasenwechselstrom.* Bei der *Sternschaltung* werden die drei Spulenanfänge zum Sternpunkt zusammengeschaltet (Abb. 80.2). Dabei werden auch Leitungen eingespart.

Der vom Sternpunkt wegführende Leiter wird als *Neutralleiter N* (oder Mittelpunktsleiter M_p) bezeichnet. Die von den Spulenenden wegführenden Leiter heißen *Außenleiter* (L_1, L_2, L_3 oder *R, S, T*). Sie werden auch als *Phasenleiter* oder kurz als *Phasen* bezeichnet. Zwischen den Enden einer jeden Induktionsspule – und damit auch zwischen Außenleiter und Neutralleiter – tritt eine Spannung von 220 V auf. Sie wird auch als *Sternspannung* bezeichnet (Abb. 80.3). Eine Außenleiterspannung, etwa U_{13}, ergibt sich als Differenz der beiden Zeiger U_1 und U_2. Für das farbig unterlegte Dreieck gilt:

$$220\text{ V} \cdot \cos 30^\circ = \frac{U_{13}}{2} \quad \Leftrightarrow \quad U_{13} = 440\text{ V} \cdot \cos 30^\circ \approx 380\text{ V}$$

Die Außenleiterspannung, also die Spannung zwischen je zwei Außenleitern, beträgt 380 V. Übliche Bezeichnungen: Drehstrom 380/220 V oder 3 x 380/220 V.

Das Niederspannungsnetz ist ein Vierleiternetz (L_1, L_2, L_3, N). Es stellt die Spannungen 380 V und 220 V zur Verfügung.

Geräte kleinerer Leistung in Haushalt, Büro usw. werden mit Einphasenwechselstrom (220 V) betrieben. Eine "normale" Steckdose liefert diesen Einphasenwechselstrom. Geräte und Maschinen größerer Leistung werden an eine Drehstromsteckdose angeschlossen ("Kraftstrom").

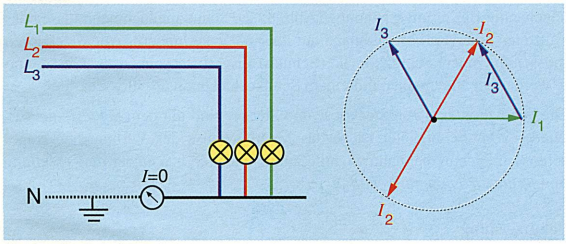
Verbraucher können prinzipiell in *Sternschaltung* oder in *Dreieckschaltung* an Drehstrom angeschlossen werden.

Sternschaltung von Verbrauchern

An jedem Verbraucher (Widerstand) liegt die Sternspannung von 220 V (Abb. 81.2).

Versuch

Drei Lampen gleicher Leistung werden in Sternschaltung angeschlossen (Abb. 81.1 links). Das Amperemeter im Neutralleiter zeigt keinen Ausschlag. Wird eine oder werden zwei Lampen entfernt, dann zeigt das Amperemeter Strom an, und zwar in beiden Fällen den gleichen Wert.



81.1 *Links:* Bei dieser Schaltung zeigt das Amperemeter keinen Ausschlag. *Rechts:* Stromzeigerdiagramm zur Schaltung

Erklärung: In allen Außenleitern sind die effektiven Stromstärken gleich. Die Ströme sind aber phasenverschoben (Abb. 81.1 rechts). Den Gesamtstrom erhält man durch Addition der einzelnen Stromzeiger. Die Addition der Zeiger I_1 und I_3 ergibt den Zeiger I_{13}, der gleich lang ist wie der Zeiger I_2, aber entgegengerichtet. I_{13} und I_2 heben sich auf. Bei symmetrischer Belastung ist der Neutralleiter stromlos.

Dreieckschaltung von Verbrauchern

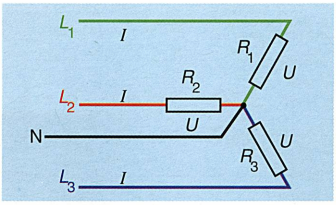
An jedem Verbraucher liegt die Außenleiterspannung von 380 V (Abb. 81.3). Daher sind auch Stromstärken und Leistung größer als bei der Sternschaltung. Wird ein Verbraucher von "Stern" auf "Dreieck" umgeschaltet, dann steigt die Leistung auf den dreifachen Wert an. Ein derartiges Umschalten wird etwa bei größeren Motoren durchgeführt.

Drehfeld

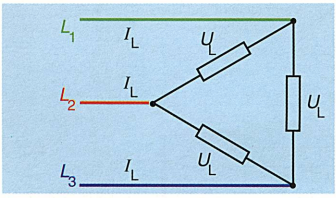
Versuch

Drei gleichartige Spulen werden wie in Abb. 81.4 an das Drehstromnetzgerät angeschlossen. Die in der Mitte aufgestellte Magnetnadel dreht sich nach dem Anstoßen.

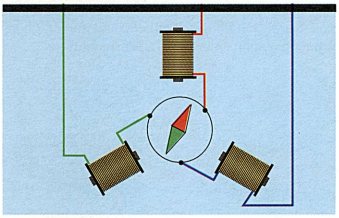
Aus dem Versuch muß man folgern, daß der Dreiphasenwechselstrom in der Spulenanordnung ein sich drehendes Magnetfeld erzeugt, das die Magnetnadel "mitnimmt". Die Ströme in den drei Spulen erreichen zeitlich versetzt ihre Maximalwerte, ebenso die erzeugten Magnetfelder. Das resultierende Magnetfeld führt während einer Periode eine Umdrehung durch. Da ein Dreiphasenwechselstrom ein Drehfeld erzeugen kann, wird er auch als *Drehstrom* bezeichnet. Dieses Drehfeld bildet die Grundlage für den Drehstrommotor.



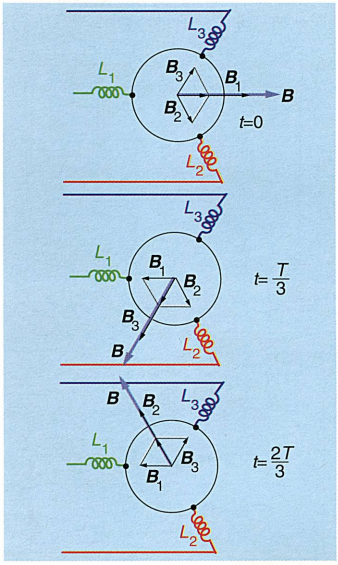
81.2 An jedem Verbraucher liegt die Sternspannung (220 V).



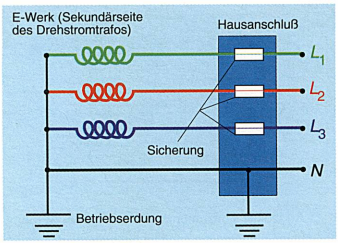
81.3 Dreieckschaltung von Verbrauchern



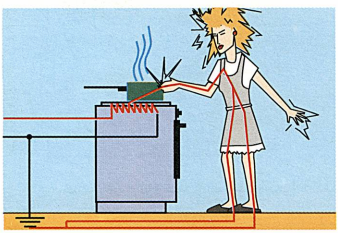
81.4 Ein magnetisches Drehfeld



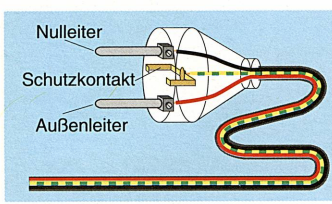
81.5 So kommt das magnetische Drehfeld zustande.



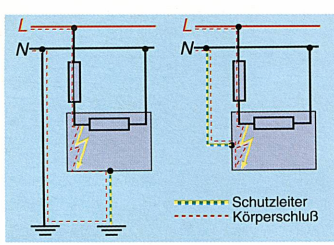
82.1 Jeder Außenleiter führt über eine Sicherung zu den "Verbrauchern" im Haus.



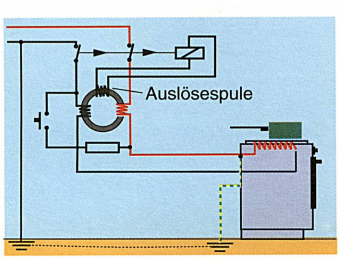
82.2 Körperschluß durch einen Gerätefehler. Ohne Schutzmaßnahmen besteht Lebensgefahr.



82.3 Schema einer Schuko-Steckdose



82.4 Schutzerdung und Nullung



82.5 Fehlerstrom-Schutzschaltung

Aufgaben

117. Zeige, daß bei der Sternschaltung – bei unsymmetrischer Belastung durch ein oder zwei Lampen – die Stromstärke im Neutralleiter jeweils gleich groß ist (Abb. 81.1).

118. Zeige, daß die Leistung beim Umschalten eines Verbrauchers von "Stern" auf "Dreieck" auf den dreifachen Wert ansteigt.

5.7 Schutzmaßnahmen

Der Neutralleiter ist mit der Erde gut verbunden (Betriebserdung) und führt daher keine Spannung gegen Erde (Abb. 82.1). Berührt ein Mensch einen Außenleiter und steht er auch mit der Erde oder mit geerdeten Gegenständen in Verbindung, dann fließt Strom durch seinen Körper. Spannungen über 65 V ergeben Stromstärken, die für den Menschen lebensgefährlich sind. Alle unter Spannung stehenden Teile eines elektrischen Gerätes sind gegen zufällige Berührung geschützt (Betriebsisolation). Durch zu starke oder falsche Beanspruchung, aber auch durch Alterung, kann diese Betriebsisolation beschädigt werden, sodaß das Gehäuse eines Gerätes mit einem spannungsführenden Teil in Berührung kommt (Körperschluß). Zwischen Gehäuse und Erde tritt eine Spannung auf. Ein Mensch, der dieses Gehäuse berührt, überbrückt dabei die sogenannte Berührungsspannung (Abb. 82.2). Schutzmaßnahmen müssen das Auftreten einer Berührungsspannung über 65 V verhindern. Alle Steckdosen müssen mit einem Schutzkontakt (Schuko) ausgerüstet sein (Abb. 82.3). Geräte werden im allgemeinen mit einem Schukostecker angeschlossen.

Die Schutzkontakte von Steckdose und Stecker sind mit dem *Schutzleiter* verbunden. Der Schutzleiter ist an das Metallgehäuse des Verbrauchers angeschlossen. Schutzmaßnahmen mit Schutzleiter sind *Schutzerdung*, *Nullung* und *Fehlerstrom-Schutzschaltung*.

Schutzerdung

Bei der Schutzerdung wird das Gehäuse des Gerätes über den Schutzleiter mit der Erde verbunden (Abb. 82.4). Tritt am Gerät ein Körperschluß auf, dann fließt ein großer Strom (Abschaltstrom) über Schutzleiter und Erde und löst die Sicherung aus. Damit die Sicherung anspricht, muß der Abschaltstrom groß genug sein, also der Erdungswiderstand entsprechend klein.

Nullung

Bei der Nullung wird das Gehäuse des Gerätes über den Schutzleiter mit dem geerdeten Neutralleiter (Nulleiter) verbunden (Abb. 82.4). Tritt ein Körperschluß auf, dann fließt über Schutzleiter und Nulleiter ein großer Strom (Abschaltstrom). Er ist praktisch ein Kurzschlußstrom, der die Sicherung auslöst.

Fehlerstrom-Schutzschaltung

Die Zuleitungen (*L*, *N*) werden über den Fehlerstrom-Schutzschalter (FI) zum Gerät geführt (Abb. 82.5). Hat das Gerät keinen Fehler, dann ist der Strom in beiden Zuleitungen und damit auch in den beiden Spulen gleich groß. Die Magnetfelder der beiden Spulen heben sich in ihrer Wirkung auf. Bei einem Körperschluß fließt ein Fehlerstrom über den Schutzleiter und die Erde zurück in das Netz. Daher sind auch die Ströme in den beiden Leitungen und damit auch in den beiden Spulen nicht mehr gleich groß. Ihre Magnetfelder heben sich nicht mehr auf, und in der Auslösespule wird eine Spannung induziert, die die beiden Zuleitungen abschaltet. Durch Drücken der Prüftaste kann ein Fehlerstrom vorgetäuscht und die Funktionstüchtigkeit des FI überprüft werden. Diese Prüfung soll etwa monatlich vorgenommen werden.

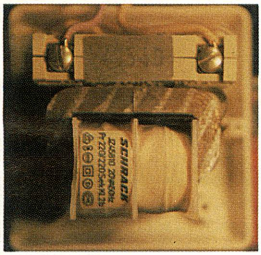
Schutzisolierung

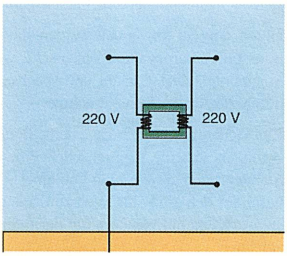
Bei schutzisolierten Geräten wird zusätzlich zur Betiebsisolation noch eine zweite Isolation angebracht. Meist ist das ganze Gehäuse aus Isolierstoff. An schutzisolierte Geräte wird kein Schutzleiter angeschlossen. Die Anschluß-

kabel sind mit Flach- oder Konturensteckern versehen, die in die Schukosteckdose passen. Die meisten Haushaltsgeräte sind schutzisoliert (Abb. 83.2).

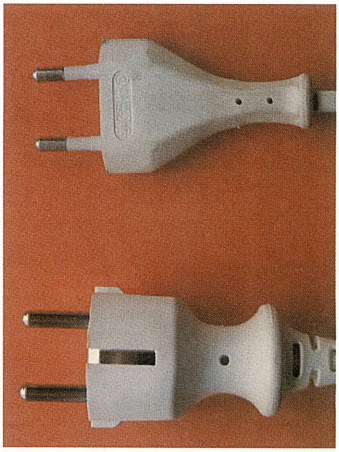
Schutztrennung

Durch einen Trenntransformator wird ein von Netz und Erde getrennter Stromkreis für den Verbraucher gebildet (Abb. 83.1). Bei einem Körperschluß in einem angeschlossenen Gerät tritt keine Berührungsspannung gegen Erde auf. Die Schutztrennung wird in speziellen Fällen, etwa für Rasierstecker im Badezimmer, angewendet.





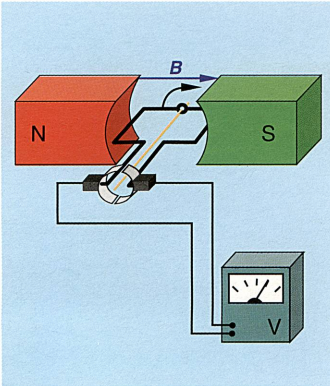
83.1 Schutztrennung und Schaltbild einer Schutztrennung



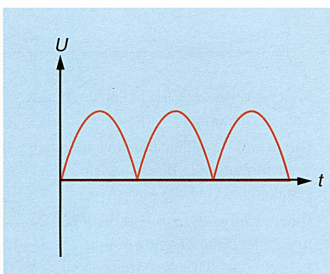
83.2 *Oben:* Stecker eines schutzisolierten Gerätes; *unten:* Stecker eines Gerätes ohne Schutzisolierung

Kontrollfragen

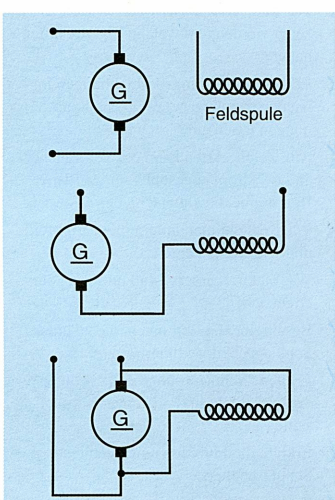
1. Erkläre den Unterschied zwischen Gleich- und Wechselspannung.
2. Wie kann eine sinusförmige Spannung erzeugt werden?
3. Was versteht man unter einem Effektivwert?
4. Warum werden Stromstärke und Spannung im allgemeinen durch ihre Effektivwerte angegeben?
5. Von welchen Größen hängt der Wechselstromwiderstand a) einer Spule, b) eines Kondensators ab?
6. Wodurch unterscheiden sich Widerstand, Spule und Kondensator bei Gleichstrom und bei Wechselstrom?
7. Leitet a) eine Spule, b) ein Kondensator bei tiefen oder bei hohen Frequenzen den Strom besser?
8. Warum blockt ein Kondensator Gleichstrom ab und läßt Wechselstrom durch?
9. Erkläre den Unterschied zwischen einer idealen und einer realen Spule.
10. Was versteht man unter dem Scheinwiderstand? Wie lautet das Ohmsche Gesetz für den Wechselstromkreis?
11. Was ist Reihenresonanz? Warum wird sie auch als Spannungsresonanz bezeichnet?
12. Was ist Parallelresonanz? Warum wird sie auch als Stromresonanz bezeichnet?
13. Wie lautet die Resonanzbedingung?
14. Was versteht man unter einem Blindwiderstand?
15. Warum ist die Wirkleistung bei einem Blindwiderstand Null, obwohl in den Leitungen Strom fließt?
16. Wie wird die Wirkleistung berechnet?
17. Was gibt der Leistungsfaktor an?
18. Warum soll der Leistungsfaktor möglichst nahe dem Wert 1 sein?
19. Wie kann der Leistungsfaktor verbessert werden?
20. Erkläre das Prinzip des Transformators.
21. Warum nimmt ein idealer, unbelasteter Transformator keine Wirkleistung auf?
22. In welchem Verhältnis stehen Spannungen, Stromstärken und Windungszahlen bei einem Transformator?
23. Welche Verluste treten bei einem realen Transformator auf?
24. Durch welche Maßnahmen werden beim Transformator die Eisenverluste klein gehalten?
25. Eine wichtige Eigenschaft des Transformators ist seine "Trennwirkung". Was versteht man darunter?
26. Welche Rolle spielt der Transformator bei der elektrischen Energieübertragung?
27. Wie kann Dreiphasenwechselstrom erzeugt werden und welche Eigenschaften hat er?
28. Erkläre die Leitungsbezeichnungen im Niederspannungsnetz. Welche Spannungen treten auf?
29. Auf welche Arten kann ein Verbraucher an Drehstrom angeschlossen werden? Beschreibe die Unterschiede.
30. Was versteht man unter einem Drehfeld und wie wird es erzeugt?
31. Was ist ein Körperschluß und wie kann er entstehen?
32. Beschreibe die Leitungen, die zu einer Schukosteckdose führen.
33. Erkläre "Schutzerdung" und "Nullung". Was geschieht im Falle eines Körperschlusses?
34. Erkläre die Funktion eines Fehlerstrom-Schutzschalters .
35. Erkläre Schutzisolierung und Schutztrennung.



84.1 Wird die Wechselspannung nicht über zwei Schleifringe, sondern über einen Kommutator abgenommen, erhält man einen pulsierenden Gleichstrom.



84.2 *U-t*-Diagramm eines pulsierenden Gleichstroms



84.3 *Oben:* Fremderregter Generator, *Mitte:* Hauptschlußgenerator, *unten:* Nebenschlußgenerator

6. Generator und Motor

Es gibt viele verschiedene Bauformen. Der größte Einfluß auf die Bauform ergibt sich durch die Stromart (Gleichstrom, Drehstrom, Einphasen-Wechselstrom).

6.1 Gleichstromgenerator

In Kap. 5.1 wurde das Prinzip des Wechselstromgenerators besprochen. In einer im Magnetfeld rotierenden Leiterschleife (Spule) wird eine Wechselspannung induziert. Mit Hilfe eines *Stromwenders* (Kommutator, Kollektor) läßt sich auch eine pulsierende Gleichspannung erzeugen (Abb. 84.1).

Durch den Stromwender werden die Anschlüsse der Leiterschleife (Induktionsspule) immer dann vertauscht, wenn sich die Richtung der induzierten Spannung ändert. Gleich- und Wechselstromgenerator unterscheiden sich nur durch die Art der Stromabnahme.

Ein Generator besteht aus dem *Ständer* (Stator) und dem *Läufer* (Rotor). Befinden sich die magnetischen Pole (zur Erzeugung des Magnetfeldes) im Ständer, dann spricht man von einer *Außenpolmaschine.* Auf den Polschuhen befinden sich die Feldspulen zur Erzeugung des Magnetfeldes. Der Läufer besteht aus einem Eisenkern mit der Induktionsspule. Er wird auch als *Anker* bezeichnet.

Befinden sich die Magnetpole auf dem Läufer und die Induktionsspule im Ständer, dann liegt eine *Innenpolmaschine* vor (Abb. 80.1). Diese hat den Vorteil, daß die Spannung direkt an den Spulen, ohne Schleifringe, abgenommen werden kann. Das ist bei höheren Leistungen günstig. Beim *fremderregten* Generator wird die Feldspule durch eine äußere, fremde Spannungsquelle versorgt (Abb. 84.3 oben). Bei kleinen Maschinen wird das Magnetfeld oft durch einen Dauermagneten erzeugt. Wird die Feldspule durch den von der Maschine selbst gelieferten Strom versorgt, so spricht man von *Selbsterregung.* Das ist deshalb möglich, da die Weicheisenkerne der Pole einen Restmagnetismus besitzen. Dieser induziert bei der Inbetriebnahme eine kleine Spannung, die wiederum das Feld verstärkt. Dadurch steigt aber die induzierte Spannung an. Dieses dynamoelektrische Prinzip wurde von *Werner Siemens* im Jahre 1866 entdeckt. Feld- und Ankerstromkreis können auf verschiedene Arten zusammengeschaltet werden. Beim *Haupt-* oder *Reihenschlußgenerator* sind Feld- und Ankerwicklung in Reihe geschaltet (Abb. 84.3 Mitte). Beim *Nebenschlußgenerator* sind Feldwicklung und Ankerwicklung parallel geschaltet (Abb. 84.3 unten).

6.2 Gleichstrommotor

Wird an eine Gleichstrommaschine eine Gleichspannung angelegt, so läuft der Generator als Motor. Die Feldspule erzeugt ein magnetisches Feld, und auf die stromdurchflossene Ankerspule wirkt ein Drehmoment. Beim *Reihenschlußmotor* sinkt mit steigender Belastung die Drehzahl ab, aber das Drehmoment steigt an. Der Reihenschlußmotor entwickelt beim Anlaufen unter Last ein großes Anzugsmoment. Er wird daher als Fahrzeugmotor verwendet. Da die Drehzahl mit abnehmender Belastung ansteigt, geht der Reihenschlußmotor im Leerlauf durch. Er darf daher nicht ohne Belastung laufen. Beim *Nebenschlußmotor* ändert sich die Drehzahl mit der Belastung nur sehr wenig.

Die *Drehrichtung* ändert sich nicht, wenn die Anschlußklemmen vertauscht werden, da ja dadurch die Stromrichtung sowohl in der Feldspule als auch in der Ankerspule geändert wird. Eine Drehrichtungsänderung erhält man nur dann, wenn entweder die Anschlüsse der Feldspule oder die der Ankerspule vertauscht werden.

6.3 Drehstromgenerator

Die Stromerzeugung in Kraftwerken erfolgt normalerweise durch sogenannte Synchrongeneratoren. Diese werden als Innenpolmaschinen gebaut. Der Läu-

fer trägt die Feldwicklung. Meist befindet sich auf der Läuferwelle noch ein Gleichstromgenerator, der den Strom für die Feldwicklung liefert. Im Ständer sind die drei um 120° verdrehten Wicklungen angebracht. Dreht sich der Läufer, so dreht sich das magnetische Feld relativ zum Ständer. Dieses Drehfeld induziert in den drei Ständerwicklungen Spannungen, die gegeneinander um 120° phasenverschoben sind (siehe Kap. 5.6 und Abb. 80.1).

6.4 Drehstrommotor

Der wichtigste Drehstrommotor ist der *Asynchronmotor*. Häufig wird er als *Kurzschlußläufer* (Käfigläufer) ausgeführt.

Versuch

Ein in Drehung versetzter U-Magnet erzeugt ein "Drehfeld". Bringt man einen drehbar gelagerten Aluminiumring in das Drehfeld, so wird er von diesem "mitgenommen" (Abb. 85.2). Seine Drehzahl ist geringer als die des Magneten (des Drehfeldes). Auch ein Käfiganker (Abb. 85.3), anstelle des Aluminiumringes, wird in Drehung versetzt.

Im Ständer des Asynchronmotors sind die Feldwicklungen angebracht. Wird Drehstrom angelegt, dann entsteht ein Drehfeld. In den Nuten des Läufers befinden sich Kupferstäbe, die an den Stirnseiten kurzgeschlossen sind. Das Drehfeld induziert im stillstehenden Läufer eine Spannung, und in den kurzgeschlossenen Kupferstäben fließt Strom. Der Läufer wird vom Drehfeld mitgenommen. Mit Zunahme der Läuferdrehzahl nimmt aber die Relativgeschwindigkeit des Drehfeldes gegenüber dem Läufer ab. Damit wird auch die induzierte Spannung im Läufer geringer. Daher kann der Läufer die Drehzahl des Ständerdrehfeldes nicht erreichen. Der Läufer läuft dem Drehfeld nach, er läuft *asynchron*. Die Differenz zwischen Drehfeld- und Läuferdrehzahl nennt man Schlupf. Kurzschlußläufermotoren sind sehr einfach im Aufbau, da dem Läufer kein Strom über Schleifringe und Bürsten zugeführt werden muß. Der Stromfluß im Läufer entsteht durch Induktion.

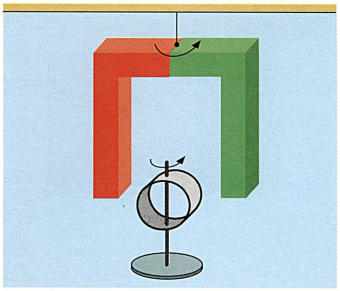
6.5 Einphasen-Wechselstrommotor

Da sich der Drehsinn eines Gleichstrommotors beim Umpolen der Anschlüsse nicht ändert, kann er im Prinzip auch mit Wechselstrom betrieben werden. Um die Wirbelstromverluste zu unterdrücken, sind die Magnetpole aus isolierten Blechen zusammengesetzt. Ein derartiger *Universalmotor* ist für Gleich- und Wechselstrom geeignet. Er wird in vielen Haushaltsgeräten verwendet.

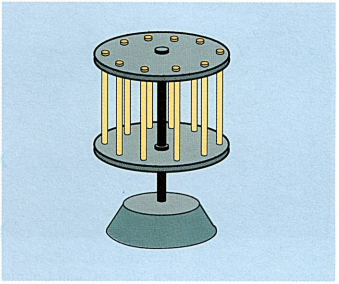
Kontrollfragen

1. Erkläre das Prinzip des Generators.
2. Wie funktioniert ein Polwender?
3. Was versteht man unter einer Innenpol-, was unter einer Außenpolmaschine?
4. Erkläre den Unterschied zwischen einem fremderregten und einem selbsterregten Generator.
5. Welche Schaltungen sind beim selbsterregten Generator möglich?
6. Erkläre das Prinzip des Motors.
7. Wodurch unterscheiden sich Reihenschluß- und Nebenschlußmotor in ihrem Verhalten?
8. Wie kann die Drehrichtung beim Gleichstrommotor geändert werden?
9. Wie ist ein Drehstromsynchrongenerator aufgebaut?
10. Erkläre Aufbau und Funktionsweise des Asynchronmotors.
11. Was ist ein Universalmotor?

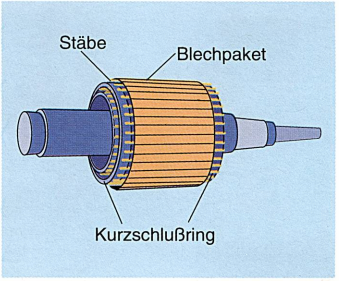
85.1 Generatorenhalle eines Laufkraftwerkes



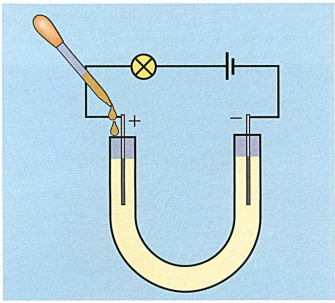
85.2 Rotiert der U-Magnet, dann beginnt auch der Aluminiumring zu rotieren.



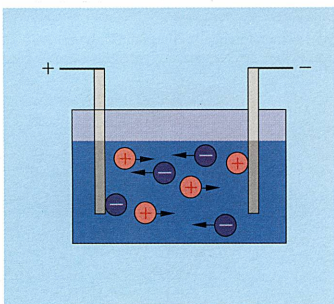
85.3 Käfiganker



85.4 Kurzschlußläufer

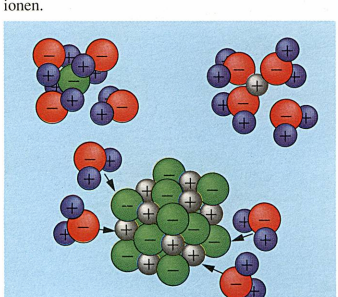


86.1 Mengt man dem Wasser einige Tropfen Säure bei, leuchtet das Lämpchen hell auf.



86.2 Der Elektrolyt hat Ionen gebildet. Im elektrischen Feld der beiden Elektroden wandern die Kationen zur Katode, die Anionen zur Anode.

86.3 Steinsalzkristall. Im Wasser löst sich das Ionengitter auf. Es entstehen Natrium- und Chloridionen.



86.4 Anlagerung von Wasserdipolen an die Ionen

7. Stromleitung in Flüssigkeiten, Gasen und Festkörpern

7.1 Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten

Elektrolyse

Versuch

Zwei Platinelektroden werden in ein U-Rohr gegeben, das mit destilliertem Wasser gefüllt ist. Legt man eine Gleichspannung an die Elektroden, stellt man mit Hilfe eines empfindlichen Amperemeters einen sehr schwachen Stromfluß fest. Die positive Elektrode wird als *Anode*, die negative als *Katode* bezeichnet. Destilliertes Wasser zeigt eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit. Mengt man dem Wasser etwas Säure bei, steigt die Stromstärke an (Abb. 86.1). Mit zunehmender Konzentration erhöht sich die Stromstärke. Dies kann man auch erreichen, indem man dem Wasser Salz beigibt. Die Leitfähigkeit von "natürlichem" Wasser rührt fast nur von den in ihm gelösten Stoffen her. Führt man den Versuch mit Petroleum durch, fließt kein Strom.

Dies zeigt: Es kann auch bei Flüssigkeiten zwischen Leitern und Nichtleitern unterschieden werden. Gute Leiter sind Säuren, Laugen und Salzlösungen, die anderen Flüssigkeiten sind meist schlechte Leiter oder Isolatoren.

Die wäßrigen Lösungen und Schmelzen, die den elektrischen Strom leiten, werden als *Elektrolyte* bezeichnet.

Die Elektrizitätsleitung in Elektrolyten erfolgt durch *Ionen*.

Ionen sind Atome oder Atomgruppen mit einem Elektronenüberschuß oder einem Elektronenmangel. Je nach Anzahl der überschüssigen oder fehlenden Elektronen spricht man von einfach, zweifach ... geladenen Ionen.

Für elektrolytische Leiter gilt bei konstanter Temperatur das Ohmsche Gesetz. Der spezifische Widerstand hängt ab von der Wanderungsgeschwindigkeit und Ladungszahl der Ionen, der Feldstärke in der Lösung, der Konzentration und der Temperatur des Elektrolyten.

Metalle werden als *Leiter erster Klasse* bezeichnet; die Elektrizitätsleitung erfolgt durch Elektronen. Elektrolyte sind *Leiter zweiter Klasse*. Hier sind die bewegten Ladungsträger Ionen.

Da die positiv geladenen Ionen zur Katode wandern, werden sie als *Kationen* bezeichnet. Analog bewegen sich die negativ geladenen Ionen zur Anode und heißen *Anionen*.

Wir wollen im folgenden die Eigenschaften *wäßriger Lösungen* untersuchen. Wird etwa ein Salzkristall (NaCl) in Wasser gegeben, löst sich das Ionengitter auf. Dadurch werden die Natrium- und Chlorionen zu frei beweglichen Ladungsträgern:

$$NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$$

Dieser Vorgang wird *Dissoziation* genannt. Beim Auflösen des Kristalls schieben sich Wassermoleküle zwischen die Ionen. Wassermoleküle sind starke elektrische Dipole mit einem Elektronenmangel an der "Wasserstoffseite" und einem Elektronenüberschuß an der "Sauerstoffseite" (Abb. 19.3 links und 86.4).

Die Ionen umgeben sich aufgrund der elektrostatischen Anziehung mit Wassermolekülen. Dies wird als *Hydratation* bezeichnet. An die Kationen lagern sich die Sauerstoffpole, an die Anionen die Wasserstoffpole an. Zur Dissoziation ist Energie erforderlich. Diese wird hier durch die elektrische Wechselwirkung der Ionen mit den Dipolmolekülen des Wassers geliefert.

Säuren dissoziieren, indem sie mit dem Wasser reagieren. Dabei gibt das Säuremolekül seinen Wasserstoff an das Wasser ab. Es bilden sich H_3O^+-Ionen. So tritt etwa bei Salzsäure(HCl) folgende Reaktion ein:

$$HCl + H_2O \rightarrow H_3O^+ + Cl^-$$

Das hydratisierte H_3O^+-Ion heißt *Hydronium-Ion*.

Bei der Reaktion von *Basen* mit dem Wasser wird ein H^+-Ion des Wassers von den Molekülen aufgenommen, die dadurch selbst zu Kationen werden.
Ammoniak (NH_3) geht mit Wasser die folgende Reaktion ein:

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4^+ + OH^-$$

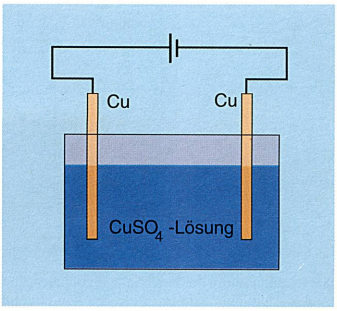
Versuch

In einem Gefäß mit Kupfersulfatlösung ($CuSO_4$) befinden sich zwei Kupferelektroden, deren Massen vorher ermittelt wurden. Nun wird eine Stunde lang Strom durch diese Lösung geschickt und dann die Elektrodenmassen nochmals bestimmt. Die Anode hat einen Massenverlust, die Katode eine Massenzunahme erfahren. Es hat sich ein gut haftender Kupferbelag auf der Katode gebildet (Abb. 87.1).

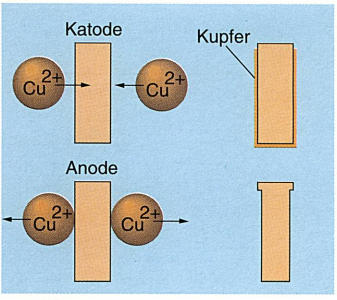
Erklärung:
Die angelegte Spannung bewirkt eine Wanderung der Ionen und damit einen elektrischen Strom in der Lösung. Der Stromübertritt zwischen der Lösung und den Elektroden erfolgt hier durch die Entladung der Ionen an den entgegengesetzt geladenen Elektroden. Die Cu^{2+}-Ionen nehmen an der Katode Elektronen auf und werden zu ungeladenen Kupferatomen:

$$Cu^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Cu$$

Gleichzeitig wandern die in der wäßrigen Lösung vorhandenen OH^--Ionen zur Anode und geben dort ihre Elektronen ab. Kupfer geht in Form von Cu^{2+}-Ionen in Lösung.
Die Verringerung der negativen Ladung an der Katode und der positiven Ladung an der Anode wird von der Spannungsquelle ausgeglichen.
Die Elektrolyse kann auch ohne Zersetzung der Elektroden erfolgen. Im *Hofmannschen Zersetzungsapparat* wird Wasser durch den Zusatz von verdünnter Schwefelsäure elektrisch leitend gemacht. An den Platinelektroden sammeln sich Wasserstoff und Sauerstoff. An der Katode bildet sich Wasserstoff, an der Anode Sauerstoff. Das Volumen des Wasserstoffs verhält sich zu dem des Sauerstoffs wie 2 : 1 (Abb. 87.3).



87.1 Die Masse der Anode nimmt ab, die Katode wird mit Kupfer überzogen.



87.2 Katode: Die Kupferionen nehmen Elektronen auf. Es entsteht ein Überzug aus metallischem Kupfer. Anode: Kupfer geht in Lösung.

Faradaysche Gesetze

Den Zusammenhang zwischen Ladungstransport und den an den Elektroden umgesetzten Stoffmengen hat *Michael Faraday* im Jahr 1833 experimentell gefunden.

1. Faradaysches Gesetz

Die an den Elektroden abgeschiedene Masse ist proportional zur Ladung, die durch den Elektrolyten geflossen ist: $m \sim Q$
Aus $m \sim Q$ und $Q = I\,t$ folgt: $m = k\,I\,t$.
Die Proportionalitätskonstante k heißt *elektrochemisches Äquivalent*. Es ist charakteristisch für jeden Elektrolyten.
Wir wollen uns nun auf die abgeschiedene Stoffmenge 1 mol beziehen.

$$k = \frac{m}{Q} = \frac{M}{L\,z\,e}$$

M ist die molare Masse eines Stoffes, L die Loschmidtkonstante, z die Ladungszahl (Wertigkeit) der Ionen, e die Elementarladung. Die Ladungszahl eines Ions ist gleich der Anzahl der gegenüber dem neutralen Atom oder Molekül abgespaltenen oder zusätzlich aufgenommenen Elektronen. Da 1 mol eines Stoffes L Teilchen enthält, sind zur Abscheidung $L.z$ Elektronen erforderlich.

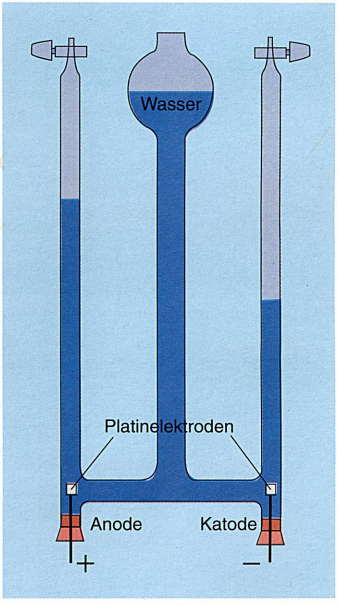
$$k = \frac{M/z}{L\,e}$$

Im Nenner des Bruches stehen nur konstante Größen.

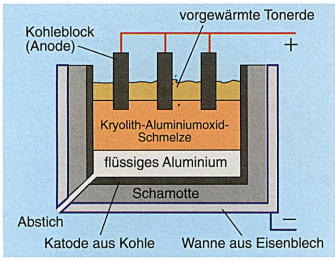
Das Produkt aus den beiden Konstanten wird *Faradaykonstante* genannt: $F = L.e$

$$F = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1} \cdot 1{,}6022 \cdot 10^{-19}\ \text{As} = 96\,484\ \text{As mol}^{-1}$$

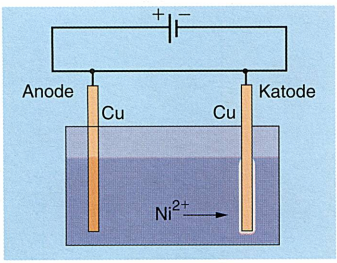
Der Ausdruck M/z heißt *Äquivalentmasse Ä*. Somit folgt: $k = \frac{Ä}{F}$



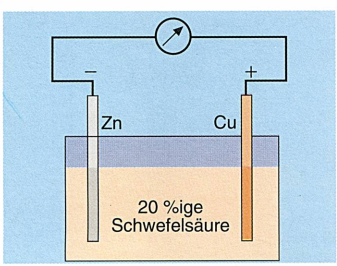
87.3 Hofmannscher Zersetzungsapparat



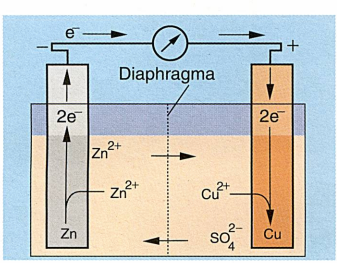
88.1 Aluminium wird durch Schmelzflußelektrolyse aus Aluminiumoxid mit Beigaben von Kryolith gewonnen. Die Katode ist eine mit Graphitsteinen ausgekleidete Wanne. Die Anode besteht aus Kohleblöcken.



88.2 Versuchsanordnung zum Vernickeln eines Kupferbleches: Die mit Brennspiritus gründlich gesäuberten Kupferbleche werden in eine einmolare Nickel-Chloridlösung getaucht. Als Spannungsquelle genügt eine Flachbatterie. Nach ein bis zwei Minuten ist die Katode mit einer Nickelschicht überzogen.



88.3 Dieses galvanische Element wird auch *Volta*-Element genannt.



88.4 Daniell-Element

2. Faradaysches Gesetz

Zur Abscheidung der Äquivalentmasse eines Stoffes ist stets dieselbe Ladung von 96 484 As erforderlich.
Mit anderen Worten:

> Die von der gleichen Stromstärke und in der gleichen Zeit in verschiedenen Elektrolyten abgeschiedenen Massen sind proportional zu ihren Äquivalentmassen.

Aus $m_1 = \frac{\ddot{A}_1}{F} I\,t$ und $m_2 = \frac{\ddot{A}_2}{F} I\,t$ folgt $\frac{m_1}{m_2} = \frac{\ddot{A}_1}{\ddot{A}_2}$

Die Faradayschen Gesetze waren ein Hinweis auf die atomistische Struktur der elektrischen Ladung.
Anwendung der Elektrolyse: Metallgewinnung, z. B. Aluminium (Abb. 88.1), Kupfer, Blei; sowie Oberflächenveredelung (Galvanisierung, Abb. 88.2).

Beispiel A

Wie groß ist die Aluminiummasse, die in einer Stunde von einem Strom von 50 A abgeschieden wird? Aluminium ist dreiwertig, seine molare Masse beträgt 26,98 g.

$$m = k\,I\,t = \frac{M\,I\,t}{z\,F}$$

$$m = \frac{26{,}98 \cdot 10^{-3}\ \text{kg mol}^{-1} \cdot 50\ \text{A} \cdot 60 \cdot 60\ \text{s}}{3 \cdot 96\,484\ \text{As mol}^{-1}}$$

$$m = 0{,}0168\ \text{kg} = 16{,}8\ \text{g}$$

Beispiel B

Welche Stromstärke ist erforderlich, um aus einer Silbernitratlösung in einer Sekunde 1,12 mg Silber abzuscheiden? Das einwertige Silber hat eine molare Masse von 107,87 g.

$$m = \frac{M\,I\,t}{z\,F} \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{m\,z\,F}{M\,t}$$

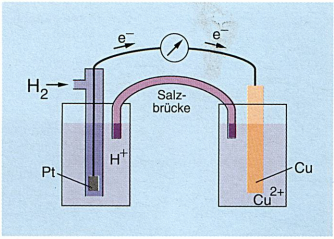
$$I = \frac{1{,}12 \cdot 10^{-6}\ \text{kg} \cdot 1 \cdot 96\,484\ \text{As mol}^{-1}}{107{,}87 \cdot 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 1\ \text{s}} = 1\ \text{A}$$

Galvanische Elemente

Versuch

Ein Kupfer- und ein Zinkstab werden in verdünnte Schwefelsäure getaucht. Verbindet man die beiden Elektroden über ein Amperemeter, stellt man einen Gleichstrom fest. Die (technische) Stromrichtung verläuft dabei vom Kupfer zum Zink. Eine solche Anordnung wird als *galvanisches Element* bezeichnet (Abb. 88.3). Die Spannung beträgt 1,1 V. Sie wird als *Urspannung* bezeichnet. Zur Erklärung der Vorgänge in einem galvanischen Element wollen wir ein *Daniell-Element* betrachten (Abb. 88.4). Es besteht aus einer Zinkelektrode in einer Zinksulfatlösung ($ZnSO_4$) und einer Kupferelektrode in einer Kupfersulfatlösung ($CuSO_4$). Um eine Durchmischung der Lösungen zu verhindern, werden sie durch ein *Diaphragma* – eine poröse Wand – getrennt. Der Durchtritt für die Ionen in der Lösung ist jedoch möglich. Verbindet man die Elektroden leitend, fließt ein elektrischer Strom.
Erklärung: Tauchen Metalle in Elektrolyten ein, so geben sie Ionen ab. Metalle zeigen ein bestimmtes Lösungsbestreben in Flüssigkeiten, welches als *Lösungstension* bezeichnet wird. Bei gelösten Salzen entsteht eine äquivalente Zahl von Anionen und Kationen. Metalle hingegen geben nur Kationen ab. Dadurch erfährt das Metall eine negative Aufladung, die unmittelbar angrenzende Flüssigkeit eine positive. Es bildet sich ähnlich einem Kondensator eine

elektrische Doppelschicht aus. Das entstehende Feld versucht die positiven Ionen auf das Metall zurückzudrängen. Es stellt sich schließlich ein dynamisches Gleichgewicht ein, bei welchem ebenso viele Ionen in Lösung gehen wie Ionen wieder ins Metall eintreten.
Da verschiedene Metalle eine unterschiedliche Lösungstension aufweisen, bilden sich unterschiedliche Potentialdifferenzen zur Lösung aus. Die Spannung des galvanischen Elementes ergibt sich im wesentlichen als Differenz der beiden entstandenen Potentialunterschiede. Somit ist eine Elektrode (gegenüber der anderen) positiv, die andere negativ. Bei einer äußeren Verbindung fließt Strom von der positiven zur negativen Elektrode. Weiters ist zu beachten, daß an der Grenze zwischen den beiden Lösungen $ZnSO_4$ und $CuSO_4$ ein weiterer Potentialsprung auftritt. Er läßt sich dadurch erklären, daß unterschiedliche Ionen verschiedene Diffusionsgeschwindigkeiten besitzen. Eine genaue Behandlung dieser Diffusionspotentiale ist Gegenstand der Elektrochemie.
An den Metallen finden Oxidations- und Reduktionsprozesse statt. Ein Stoff wird oxidiert, wenn er Elektronen an die Elektrode abgibt, er wird reduziert, wenn er Elektronen aufnimmt. Dies sind energieliefernde *spontane* Reaktionen. An den Übergängen Metall – Elektrolyt findet dann ein Wechsel von der Elektronen- zur Ionenleitung statt.



89.1 Man kombiniert die Normal-Wasserstoffelektrode beispielsweise mit einer Kupferelektrode, die in eine Lösung mit Cu^{2+}-Ionen getaucht ist. Als Salzbrücke bezeichnet man eine Glasröhre, die mit einer konzentrierten Salzlösung gefüllt ist. Deren Ionen ermöglichen den Stromfluß zwischen den beiden sogenannten Halbzellen, ohne daß sich die Lösungen in den Halbzellen mischen. Die gemessene Urspannung beträgt 0,34 V bei einer jeweiligen Ionenkonzentration von 1 mol/l.

In einem galvanischen Element wird chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt.

Die Lösungstension des Kupfers ist wesentlich kleiner als die des Zinks. Das hat zur Folge, daß die Kupferelektrode der positive Pol und die Zinkelektrode der negative Pol wird.
Somit fließen Elektronen über die äußere Leitung vom Zink zum Kupfer. Um ihr Potential aufrecht zu erhalten, muß die Zinkelektrode Zn^{2+}-Ionen in die Lösung abgeben. Ebenso müssen die zusätzlichen Elektronen an der Kupferelektrode durch Aufnahme von Cu^{2+}-Ionen neutralisiert werden.
Diese Vorgänge können so beschrieben werden:

$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2\,e^-$$

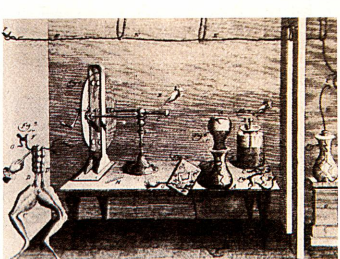
$$Cu^{2+} + 2\,e^- \rightarrow Cu$$

Metall	Spannung in Volt
Li^+	– 3,02
K^+	– 2,92
Na^+	– 2,71
Mg^{2+}	– 2,35
Zn^{2+}	– 0,76
Fe^{2+}	– 0,44
Ni^{2+}	– 0,25
Pb^{2+}	– 0,13
H^+	0,00
Cu^{2+}	0,34
Ag^+	0,81
Hg^{2+}	0,85
Au^+	1,50

89.2 Elektrochemische Spannungsreihe. Diesen Zahlenwert erhält man dann, wenn das Metall in eine Lösung taucht, in welcher die Konzentration der Ionen 1 mol/l beträgt.

Elektrochemische Spannungsreihe

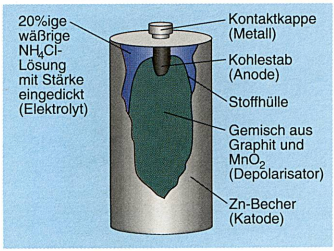
Um die Einzelpotentiale der verschiedenen Metalle gegenüber Lösungen messen zu können, muß eine leitende Verbindung mit der Lösung hergestellt werden. Dazu wird jedoch eine zweite Metallelektrode benötigt. Man erhält wieder ein galvanisches Element, dessen Spannung durch die Potentialdifferenzen beider Elektroden bestimmt ist. Aus diesem Grund geht man von einer Standardelektrode aus. Dies ist die *Normal-Wasserstoffelektrode*, welche aus einer mit Platinschwarz überzogenen Platinelektrode besteht, die von reinem Wasserstoff umspült wird. Die Elektrode taucht in verdünnte Schwefelsäure, die 1 mol H^+-Ionen je Liter enthält. Zwischen den H^+-Ionen der wäßrigen Lösung und dem Wasserstoff stellt sich ein Gleichgewicht ein wie zwischen dem Metall und seinen Ionen. Diese Standardelektrode weist gegenüber der Lösung ein bestimmtes Potential auf. Man mißt nun die Spannung zwischen diesem Potential und dem eines bestimmten Metalls (Abb.89.1). Wird der Normal-Wasserstoffelektrode das Potential Null zugeordnet, erhält man die *elektrochemische Spannungsreihe* (Tab. 89.2).



89.3 *Luigi Galvani* (1737 – 1798) war ein italienischer Arzt. Er entdeckte, daß Froschschenkel, die zwei verschiedene, miteinander verbundene Metalle berührten, zuckten. Galvani interpretierte diese Erscheinung als tierische Elektrizität. Das Bild ist eine zeitgenössische Darstellung des Originalversuches.

Elektrolytische Polarisation

Bei elektrolytischen Vorgängen treten mehrere chemische Reaktionen gleichzeitig auf, welche zu einer Veränderung der Elektroden und damit zu einer Änderung der Spannung führen. Dieser Vorgang wird als elektrolytische Polarisation bezeichnet. Legt man etwa an zwei Platinelektroden, die in leicht gesäuertes Wasser getaucht sind, eine Spannung, überzieht sich die Katode mit Wasserstoff H_2 und die Anode mit Sauerstoff O_2. Wird die Spannungsquelle abgeschaltet, kann ein Stromfluß in entgegengesetzter Richtung gemessen werden. Dies läßt sich dadurch erklären, daß die mit Gas überzogenen Elektro-



90.1 Leclanché-Element

Laden:

Pluspol: $PbSO_4 + SO_4^{2-} + 2\,H_2O \rightarrow$
$\rightarrow PbO_2 + 2\,H_2SO_4 + 2\,e^-$

Minuspol: $PbSO_4 + 2\,H^+ + 2\,e^- \rightarrow$
$\rightarrow Pb + H_2SO_4$

Entladen:

Pluspol: $PbO_2 + 2\,H^+ + 2\,e^- + H_2SO_4 \rightarrow$
$\rightarrow PbSO_4 + 2\,H_2O$

Minuspol: $Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2\,e^-$

90.2 Die chemischen Vorgänge beim Laden und Entladen eines Bleiakkumulators

Schaltung von Spannungsquellen

(1) Ein Akkumulator wird mit einem Amperemeter und einem Widerstand in Serie geschaltet. Der Spannungsabfall wird mit einem parallel geschalteten Voltmeter gemessen. Nun wird ein gleichartiger Akkumulator so angeschlossen, daß der Pluspol der einen Quelle mit dem Minuspol der anderen verbunden ist. Die beiden Akkumulatoren sind *in Serie* geschaltet. Es zeigt sich, daß sich die Spannung verdoppelt hat, aber die Stromstärke gleich geblieben ist.

(2) Nun wird der zweite Akkumulator *parallel* zum ersten geschaltet. Das bedeutet: Die gleichnamigen Pole werden zusammengeschlossen. Die gemessene Spannung ist gleich geblieben, die Stromstärke hat sich verdoppelt.

Beachte: Bei Serienschaltung von Spannungsquellen mit unterschiedlichen Stromstärken können die Erzeuger mit der kleineren Stromstärke überlastet und zerstört werden. Bei parallel geschalteten Elementen mit unterschiedlichen Spannungen fließen Ausgleichsströme, die zur Entladung der Quellen mit hoher Einzelspannung führen.

Spannungsquellen werden in Serie geschaltet, um eine höhere Spannung zu erhalten. Sie werden parallel geschaltet, um eine größere Stromstärke zu erzielen.

den selbst ein galvanisches Element der Form $Pt/H_2/H^+$, $OH^-/O_2/Pt$ darstellen. Dieses weist eine dem Elektrolyseprozeß entgegengerichtete Spannung auf, die als Polarisationsspannung bezeichnet wird. Um diese zu verhindern, verwendet man Depolarisatoren.

Elektrochemische Spannungsquellen

Hiebei unterscheidet man zwischen *Primärelementen* und *Sekundärelementen*. Primärelemente liefern nur so lange Strom, bis eine Elektrode aufgebraucht ist. Sie sind nicht wiederverwendbar. Eine praktische Bedeutung haben die Elemente nach *Leclanché* (Abb. 90.1).

Die positive Elektrode besteht aus Kohle, die von Braunstein umgeben ist. Dieser soll die elektrolytische Polarisation verhindern. Die negative Elektrode ist aus Zink. Als Elektrolyt dient eine Salmiak- oder Magnesiumchloridlösung, die mit Stärke eingedickt ist. Die Spannung im Leerlauf beträgt 1,5 V.

Sekundärelemente sind elektrochemische Spannungsquellen, welche nach ihrer Entladung wieder aufgeladen werden können. Dies bedingt, daß die Veränderung der Elektroden durch das Aufladen wieder rückgängig gemacht werden kann. Sekundärelemente werden auch als *Akkumulatoren* bezeichnet.

Bleiakkumulator

Er besteht aus Bleiplatten mit verdünnter Schwefelsäure als Elektrolyten. Auf den Bleiplatten bildet sich eine Bleisulfatschicht. Beim Aufladen wird diese Schicht am Pluspol in braunes Bleioxid umgewandelt, während der Minuspol zu grauem Blei reduziert wird. Es wird somit elektrische Energie in chemische Energie umgewandelt. Beim Entladen wandern aus der Lösung SO_4^{2-}-Ionen an die Bleielektrode, die H^+-Ionen an die Bleioxidelektrode.

Wird der Akkumulator aufgeladen, nimmt die Konzentration der Schwefelsäure zu, beim Entladen sinkt sie ab. Daher kann mit Hilfe eines Aräometers der Ladezustand ermittelt werden. Es ist zu beachten, daß es zu keinem Überladen des Akkumulators kommt, da dabei die Zersetzung des Wassers in Wasserstoff und Sauerstoff erfolgt. Dies ergibt ein hochexplosives Knallgasgemisch.

Eine *Zelle* liefert eine Spannung von 2 V. In der technischen Ausführung werden meist mehrere Zellen hintereinandergeschaltet. Die Ladung eines Bleiakkumulators wird in Amperestunden angegeben. Der Nachteil der Bleiakkumulatoren liegt im hohen Gewicht und den relativ hohen Kosten.

Alkalische Akkumulatoren

Weiters verwendet man *alkalische Akkumulatoren* mit Nickel-Eisen-Elementen und Kalilauge, deren Vorteile in der geringeren Masse und der geringeren Empfindlichkeit liegen. Alkalische Akkumulatoren werden meist als *Knopfzellen* gefertigt. So gibt es beispielsweise Nickel-Cadmium- oder Quecksilberoxid-Zink-Knopfzellen.

Die elektrochemischen Energiequellen haben ungeheure Bedeutung für den Betrieb elektronischer Geräte in der Unterhaltungselektronik, Rechentechnik und in der Meß- und Regelungstechnik erlangt. Weiters werden sie als Energiequelle zum Starten von Motoren sowie als Notstromaggregate verwendet. Die Problematik liegt in der Entsorgung nicht mehr verwendbarer Elemente. Sie enthalten zum Teil hochgiftige Metalle, die einem entsprechenden Recyclingprozeß unterworfen werden müssen.

Aufgaben

119. Mit Hilfe einer bestimmten Stromstärke werden in 7 min 1,5 g Sauerstoff elektrolytisch abgeschieden. Welche Zeit ist erforderlich, um mit dieser Stromstärke 20 g Kupfer aus einer Kupfersulfatlösung abzuscheiden? Kupfer und Sauerstoff sind zweiwertig. $M_{Cu} = 63{,}5$ g, $M_O = 16$ g

120. Ein quadratisches Messingblech ($a = 6$ cm) soll vernickelt werden. Wie lang muß ein Strom von 1,5 A fließen, bis eine Schichtdicke von 0,4 mm erreicht ist? Nickel ist zweiwertig. $M_{Ni} = 58{,}71$ g, $\rho_{Ni} = 8910$ kg m^{-3}

121. Welche Stromstärke ist erforderlich, um in 12 h 40 g dreiwertiges Eisen elektrolytisch zu erhalten? $M_{Fe} = 55{,}85$ g

Kontrollfragen

1. Was sind Ionen?
2. Was versteht man unter einem Elektrolyt?
3. Was versteht man unter Kationen und Anionen?
4. Erkläre den Begriff Dissoziation.
5. Wie erfolgt die Lösung von Salzen in wäßrigen Lösungen?
6. Wie dissoziieren Säuren, wie Basen?
7. Was geschieht beim Stromdurchgang durch eine Kupfersulfatlösung und Kupferelektroden?
8. Was versteht man unter Elektrolyse?
9. Wie kann Wasser in seine chemischen Bestandteile zerlegt werden?
10. Wie lautet das 1. Faradaysche Gesetz?
11. Was versteht man unter dem elektrochemischen Äquivalent?
12. Wie ist die Faradaykonstante definiert?
13. Wie lautet das 2. Faradaysche Gesetz?
14. Welche Anwendungen gibt es für die Elektrolyse?
15. Was ist ein galvanisches Element?
16. Erkläre den Begriff "Lösungstension".
17. Beschreibe den Aufbau eines Daniell-Elementes.
18. Erläutere die Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie anhand des Daniell-Elementes.
19. Erkläre den Aufbau der Normal-Wasserstoffelektrode.
20. Was versteht man unter der elektrochemischen Spannungsreihe?
21. Was ist elektrolytische Polarisation?
22. Erkläre die Begriffe "Primär-" und "Sekundärelemente".
23. Was sind Akkumulatoren?
24. Beschreibe den Lade- und den Entladevorgang des Bleiakkumulators.
25. Welche Probleme gibt es mit elektrochemischen Spannungsquellen?
26. Wie können Spannungsquellen geschaltet werden?

7.2 Elektrizitätsleitung in Gasen

Versuch

Eine mit Luft gefüllte Glasröhre, die an ihren Enden zwei Elektroden besitzt, wird an eine Gleichspannung von einigen tausend Volt gelegt. Nun beginnt man, die Röhre mit Hilfe einer Pumpe zu evakuieren. Die Folge ist, daß bei sinkendem Druck im Inneren ein violett leuchtendes Band erscheint (Abb. 91.1).

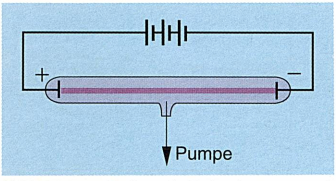
Erklärung: Gase sind im allgemeinen gute Isolatoren. Diese Eigenschaft ist jedoch an bestimmte physikalische Bedingungen geknüpft, wie beispielsweise Druck und Temperatur. Bei Gewittern zeigt sich, daß Luft kein idealer Isolator ist. Aus der Stromleitung in Flüssigkeiten wissen wir, daß für die Elektrizitätsleitung bewegte Ladungsträger erforderlich sind. In Gasen sind dies je nach Bedingungen geladene makroskopische Teilchen (z. B. Staubteilchen), Ionen oder Elektronen.

Bei unserem Versuch sind in der Röhre aufgrund des starken elektrischen Feldes stets Ladungsträger (Ionen und Elektronen) vorhanden. Die positiven Ionen bewegen sich zur Katode, die negativen Ionen und Elektronen zur Anode. Bei verringertem Druck, dies bedeutet eine geringere Teilchendichte, können nun die Ladungsträger eine größere Strecke ohne Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen zurücklegen. Dadurch wächst ihre kinetische Energie derart an, daß sie beim Zusammenstoß mit neutralen Molekülen oder Atomen sowie beim Auftreffen auf die Elektroden neue Ladungsträger durch Elektronenabspaltung erzeugen. Ein Stoß eines Ladungsträgers verursacht zwei geladene Teilchen, die ihrerseits wieder je zwei Ionen mit den zugehörigen Elektronen erzeugen können usw. Dieser Vorgang wird als *Stoßionisation* bezeichnet (Abb. 91.2). Dadurch kommt es zu einer Stromleitung im Gas, die als *selbständige elektrische Gasentladung* bezeichnet wird.

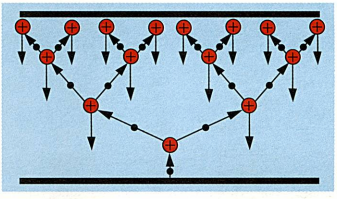
Weiters werden die Gasteilchen durch die Zusammenstöße zur Abgabe einer Strahlung angeregt. Elektronen werden auf höhere Energieniveaus gehoben und geben beim Zurückfallen die Energie in Form von Licht ab.

Man spricht von einer *unselbständigen elektrischen Gasentladung,* wenn die Ionisierung des Gases etwa durch Röntgenstrahlung oder radioaktive Strahlung erfolgt (Abb. 91.3). Wird diese Energiezufuhr von außen eingestellt, hört die Ionisation und damit der Stromfluß auf. Diese Eigenschaft wird ausgenützt, um radioaktive Strahlung zu messen.

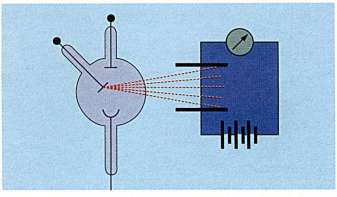
Die Elektrizitätsleitung in Gasen wird in *Gasentladungslampen* angewendet.



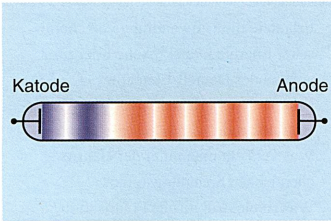
91.1 Pumpt man Luft aus der Röhre, kann man nach einiger Zeit ein violett leuchtendes Band beobachten.



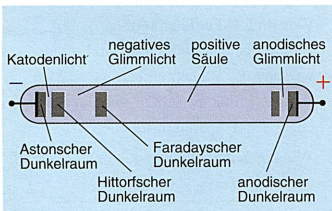
91.2 Stoßionisation



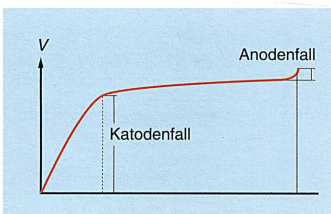
91.3 Legt man an den Plattenkondensator eine Gleichspannung, fließt kein Strom mehr, wenn der Kondensator aufgeladen ist. Läßt man durch den Raum zwischen den beiden Kondensatorplatten Röntgenstrahlen hindurchgehen, zeigt der Ausschlag des Galvanometers, daß wieder Strom fließt. Erklärung: Röntgenstrahlen sind besonders energiereich. Sie trennen Elektronen von den Gasmolekülen, die dabei zu Ionen werden.



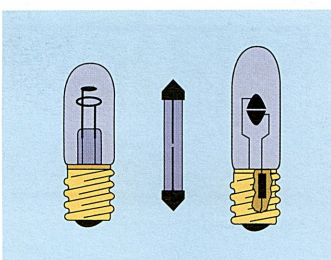
92.1 Glimmentladung



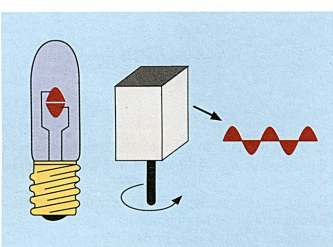
92.2 Abschnitte einer Glimmentladung



92.3 Potentialverlauf einer Glimmentladung



92.4 Glimmlampen



92.5 Aufgrund der angelegten Wechselspannung leuchten die beiden Elektroden abwechselnd auf.

Versuch

Wird der Druck in der Glasröhre weiter verringert, entsteht die sogenannte *Glimmentladung* (Abb. 92.1, 92.2). Bei der Glimmentladung können mehrere Farbbereiche beobachtet werden. Die dabei auftretenden Farben sind von Gas zu Gas unterschiedlich. Der Name stammt daher, daß sich die Elektroden mit einer "glimmenden Lichthaut" überziehen.

Abb. 92.3 zeigt den Potentialverlauf bei der Glimmentladung, welcher vor allem an den beiden Elektroden ein nichtlineares Verhalten aufweist. Die größte Spannungsdifferenz, die in der Nähe der Katode auftritt, wird als *Katodenfall* bezeichnet. Dieser ist der wichtigste Abschnitt der Glimmentladung. Darauf folgt ein linearer Spannungsanstieg zur Anode hin. In der Nähe der Anode tritt der sogenannte *Anodenfall* auf. Dieser ist jedoch wesentlich kleiner als der Katodenfall. Das elektrische Feld im gesamten Gasraum ist somit nicht homogen. Es ist an den beiden Elektroden stark verzerrt.

Die Glimmentladung ist von Farbeffekten begleitet, die von den Abmessungen der Röhre, den Eigenschaften des Gases und dem Gasdruck abhängen. Die Ursache für den Potentialverlauf liegt in den beim Stromdurchgang auftretenden *Raumladungen*. Diese bilden sich aufgrund der unterschiedlichen Beweglichkeit der negativen und positiven Ladungsträger aus. Beim Durchlaufen einer Spannung erhalten die Ionen und die Elektronen kinetische Energie. Da Masse und Größe eines Elektrons kleiner sind als die eines Ions, wird dem negativen Ladungsträger einerseits eine höhere Geschwindigkeit erteilt, andereseits kann er eine größere Strecke zwischen zwei Zusammenstößen mit anderen Gasteilchen zurücklegen. Die große Geschwindigkeitsdifferenz führt zu einer unterschiedlichen Konzentration der Ladungsträger, zu Raumladungen.

Die durch den Aufprall positiver Ionen aus der Katode herausgelösten Elektronen haben vorerst eine sehr kleine Geschwindigkeit. Die Elektronendichte ist noch gering (*Astonscher Dunkelraum*). Daran anschließend entsteht das *Katodenlicht*. Wesentliche Bereiche vor der Katode sind der *Hittorfsche Dunkelraum* und das *negative Glimmlicht*. Im Hittorfschen Dunkelraum werden die Elektronen stark beschleunigt. Dies führt zur Ionisierung weiterer Gasatome. Die Ursache für den starken Potentialanstieg (Katodenfall) ist eine positive Raumladung vor der Katode. Es stellt sich ein stationärer Zustand ein, bei dem die von den positiven Ionen aus der Katode gelösten Elektronen ausreichen, um die nötige Zahl positiver Ionen neu zu erzeugen.

Energieabgabe in Form elektromagnetischer Strahlung ist durch Stoßanregung und durch Rekombination möglich; dabei fangen die positiven Ionen Elektronen ein und werden unter Emission von Strahlung zu neutralen Atomen (negatives Glimmlicht).

Da das elektrische Feld auf der folgenden Strecke relativ schwach ist, erhalten die Elektronen nur langsam genügend Energie für weitere Ionisationsvorgänge. Die Konzentration von positiven und negativen Ladungsträgern ist ungefähr gleich, es kommt zu keiner Raumladung. Daher ändert sich in diesem Bereich das Potential linear.

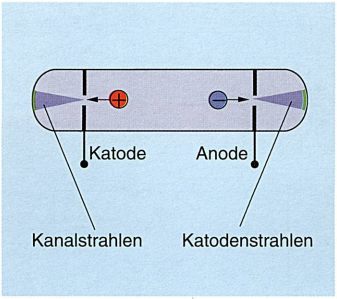
Die *positive Säule* besteht aus einem *Plasma*. Dieses ist ein ionisiertes Gas, welches positive und negative Ladungsträger derart enthält, daß das Gas nach außen hin "quasineutral" ist. Es kann dabei zu einer Ausbildung leuchtender Schichten kommen. Durch die Größe der Glasröhre können sich einzelne Bereiche der Glimmentladung verschieben oder überhaupt verschwinden. Das negative Glimmlicht fehlt jedoch nie.

Ein Anwendungsbeispiel ist die *Glimmlampe*. Sie ist eine Gasentladungslampe, bei welcher der Elektrodenabstand so gering ist, daß keine positive Säule entsteht. Es ist nur das negative Glimmlicht der Katode sichtbar. Aufgrund dieser Tatsache kann die Glimmlampe als Polsuchlampe verwendet werden. Sie dient auch als Phasenprüflampe im Wechselstromkreis. Es gibt verschiedene Ausführungen von Glimmlampen.

Versuch

Schließt man die Glimmlampe (Abb.92.4) an eine Wechselspannung an, sieht man beide Elektroden leuchten. Man betrachtet die Lampe nun in einem rotie-

renden Spiegel: Es zeigt sich, daß die beiden Elektroden abwechselnd, nie gleichzeitig, leuchten. Die Frequenz des Bildwechsels gibt Aufschluß über die Frequenz der angelegten Wechselspannung.
Wird die Gasentladungsröhre mit durchbohrten Elektroden betrieben, kann bei geeignetem Unterdruck hinter den Elektroden eine Strahlung festgestellt werden.
Durch das Loch der Anode fliegen Elektronen nach rechts (Abb. 93.1) Sie werden dadurch sichtbar, daß sie auf dem Glas einen grünen Lichtfleck erzeugen. Zum Nachweis, daß es sich um negativ geladene Teilchen handelt, kann man sie einem Magnetfeld aussetzen. Die Lorentzkraft bewirkt eine Ablenkung des Strahls. Diese Elektronenstahlung wird als *Katodenstrahlung* bezeichnet. Durch das Loch der Katode fliegen positiv geladene Ionen, welche hinter der Elektrode ebenfalls eine Leuchterscheinung hervorrufen. Durch Ablenkung im Magnetfeld kann ihre positive Ladung nachgewiesen werden. Man nennt diese Strahlen *Kanalstahlen.*

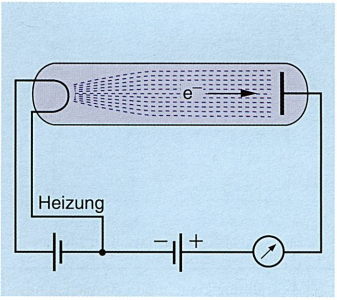


93.1 Kanal- und Katodenstrahlen

Glühelektrischer Effekt

Versuch

An eine evakuierte Glasröhre, welche zwei Elektroden enthält, wird eine Gleichspannung gelegt (Abb.93.2). Wird die Katode – sie ist ein dünner Wolframdraht – durch eine elektrische Heizung zum Glühen gebracht, zeigt das Amperemeter einen Ausschlag. Sowie man die Katode nicht mehr beheizt oder die Elektrodenanschlüsse vertauscht, wird der Stromkreis unterbrochen.
Erklärung: Da die Röhre evakuiert ist, erfolgt die Stromleitung nicht über die Ionisierung eines Gases, sondern durch Elektronen, die aus der Glühkatode austreten und zur Anode hin beschleunigt werden. Wird die Katode nicht beheizt, versiegt der Elektronenstrom. Die Elektronen aus einer beheizten Anode können den Raum zur Katode nicht überwinden, sondern werden durch das elektrische Feld zur Anode zurückgedrängt.
Der Austritt der Elektronen kann mit dem Verdampfen einer Flüssigkeit verglichen werden. Durch die Zufuhr innerer Energie erhalten die Elektronen große kinetische Energie, sie können das Metall verlassen.
Die Katode wird entweder direkt oder indirekt beheizt. Im ersten Fall fließt der Heizstrom durch das emittierende Material, im zweiten Fall durch einen isolierten Heizfaden im Inneren der Katode.



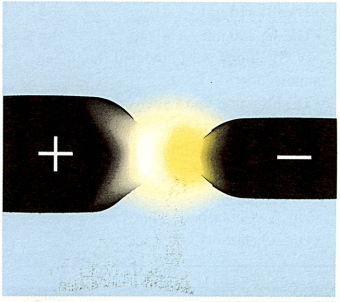
93.2 Der glühelektrische Effekt

Glühelektrischer Effekt
Aus glühenden Metallen können Elektronen austreten. Die Zahl der austretenden Elektronen hängt dabei sehr stark von der Temperatur ab.

Lichtbogen

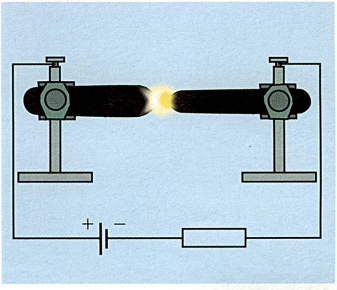
Versuch

Zwei Kohleelektroden werden über einen Vorwiderstand an Gleichspannung gelegt. Werden die Elektroden nun zur Berührung gebracht und dann auseinandergezogen, bildet sich ein *Lichtbogen* aus (Abb. 93.3). Dieser weist eine Temperatur von 3 600 °C bis 4 000 °C auf.



93.3 Lichtbogen

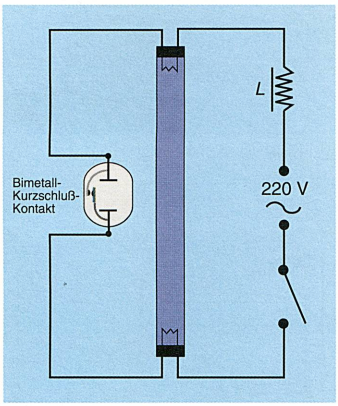
Werden die beiden Elektroden zur Berührung gebracht, ist der Stromkreis geschlossen. An der Berührungsstelle ist der elektrische Widerstand infolge des geringen Berührungsquerschnitts sehr hoch. Dies führt zu einer so starken Erhitzung, daß die Kohlen zu glühen beginnen. Beim Auseinanderziehen entsteht aufgrund des kleinen Abstandes ein starkes elektrisches Feld. Dessen Energie reicht aus, um die aus der Katode austretenden Elektronen (glühelektrischer Effekt) so stark zu beschleunigen, daß eine Ionisierung der Luft und eine Gasentladung, die sogenannte *Bogenentladung*, stattfinden. Die Anode wird durch den Aufprall der Elektronen, die Katode durch den Aufprall der positiven Ionen weiter erhitzt. Die Temperatur der Anode ist höher als die der Katode, da auf die positive Elektrode nicht nur jene Elektronen aufprallen, welche durch die Ionisierung entstehen, sondern auch die von der Katode ab-



93.4 Aufgrund des großen elektrischen Widerstands an der Berührungsstelle beginnen die Kohlen zu glühen.

Glühlampe	*Leuchtstofflampe*
9 – 14 lm/W	40 – 90 lm/W
1 000 h Lebensdauer	5 000 – 10 000 h Lebensdauer

94.1 Glühlampe und Leuchtstofflampe im Vergleich



94.2 Eine Leuchtstoffröhre mit Glimmzünder

UV-Strahlung kann in drei Bereiche unterteilt werden:
- UV-A: 400 nm – 310 nm
- UV-B: 310 nm – 280 nm
- UV-C: 280 nm – 100 nm

UV-Strahlung wird in vielen Bereichen angewendet:
- Desinfektion von Lebensmitteln, Raumluft (z. B. von Operationssälen),
- in der Kopiertechnik,
- in der Medizin zur Behandlung gewisser Hauterkrankungen (Höhensonne),
- zur Wasseraufbereitung,
- zur Aushärtung von Lacken.

94.3 Diese Stadtausfahrt ist mit Natriumdampflampen beleuchtet.

gegebenen Elektronen. So besitzt die Anode einen Krater, die Katode eine Spitze. Der Katodenfall bei der Bogenentladung ist wesentlich kleiner als bei der Glimmentladung. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die von der heißen Katode ausgesandten Elektronen die positive Raumladung zum Teil neutralisieren. Die Stromstärke hingegen ist sehr groß. Daher muß die Versuchsanordnung mit einem Vorwiderstand betrieben werden.
Bogenlampen erzeugen sehr intensives Licht.
Ein Lichtbogen bildet sich nicht nur bei Elektroden aus Kohle, sondern auch bei metallischen Elektroden in Luft und in Lampen mit Quecksilberdampffüllung aus.

Bei geeigneten Betriebsbedingungen können sehr hohe Temperaturen (weit über 10 000 °C) erreicht werden. Der Lichtbogen findet seine Anwendung beim Schweißen und in Schmelzöfen.

Die Entwicklung der Gasentladungslampen hat die Lichttechnik grundlegend beeinflußt. Durch die Wahl des Gases, seines Druckes und der Abmessungen der Röhre kann das emittierte Licht in seiner spektralen Zusammensetzung verändert werden.

Leuchtstofflampe

Leuchtstofflampen bestehen aus einem Glaskolben, welcher an der Innenseite mit einer Leuchtschicht überzogen ist. Diese besteht aus Lack, der mit Leuchtstoffen versetzt ist. Dazu verwendet man fluoreszierende Metallsalze. Die Röhre selbst ist meist mit Quecksilberdampf gefüllt. Bei der Entladung des ionisierten Quecksilberdampfes entsteht UV-Licht, das in der Beschichtung in sichtbares Licht umgewandelt wird. Durch geeignete Mischung der Leuchtstoffe kann man dem Licht nahezu jede beliebige Farbe geben, insbesondere läßt sich annähernd Tageslicht erzeugen. Weiters bildet sich bei der Gasentladung schwach bläuliches Licht im sichtbaren Bereich.

Die Vorteile der Leuchtstofflampe gegenüber der Glühlampe liegen in der hohen Lichtausbeute, den geringen Betriebskosten und der langen Lebensdauer. Trotz ihres höheren Preises amortisiert sich die Leuchtstofflampe sehr rasch.

Schaltung einer Leuchtstofflampe (Abb. 94.2)

Beim Einschalten wird vorerst eine Glimmlampe gezündet. Dadurch erwärmt sich ein Bimetallstreifen, der sich krümmt und dabei die Glimmlampe kurzschließt (Glimmzünder). Die Glühelektroden der Leuchtstofflampe werden erhitzt, sodaß sie Elektronen an das Gas abgeben. Durch Abkühlung des Bimetalls wird der Kontakt plötzlich unterbrochen. Die Unterbrechung erzeugt an der Drosselspule aufgrund der Selbstinduktion einen Spannungsstoß, der ausreicht, um eine Stoßionisation in der Glasröhre in Gang zu bringen. Dann verhindert die Drossel ein Ansteigen der Stromstärke. Es folgt nun eine selbständige Gasentladung. Es stellt sich an der Leuchtstoffröhre eine Spannung ein, welche die Glimmlampe nicht mehr zünden kann.

Für den *Ultraviolett (UV)*-Bereich verwendet man ebenfalls Quecksilberdampflampen, welche je nach Ausführungsart diesen Spektralbereich abdecken. Die Glasröhren bestehen dabei aus Glassorten (z. B. Quarzglas), welche vor allem für ultraviolette Strahlung durchlässig sind.

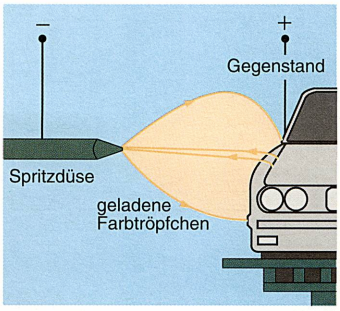
Beachte:
Eine Überdosis an UV-Strahlung kann gefährliche Hautkrankheiten zur Folge haben. Weiters entsteht durch die Einwirkung ultravioletter Strahlung Ozon. Eine zu hohe Ozonbelastung ist zu vermeiden.

Beim Betrieb von Gasentladungslampen ist zu beachten, daß sie mit einem Vorwiderstand betrieben werden, damit die Stromstärke nicht zu stark ansteigt. *Natriumdampflampen* sind Gasentladungslampen, die Natrium enthalten. Sie geben monochromatisches Licht im gelb-orangen Bereich ab, welches eine sehr hohe Leuchtdichte aufweist (150 lm/W). Natriumdampflampen werden zur Straßenbeleuchtung verwendet (Abb. 94.3).

Es wird an der Entwicklung von Gasentladungslampen für Fahrzeugscheinwerfer gearbeitet, die die Halogenglühlampen verdrängen sollen.
Eine weitere Form der selbständigen Gasentladung ist die *Korona-* oder *Spitzenentladung*. Sie tritt an elektrisch geladenen Spitzen, Kanten und dünnen Drähten auf. Die hohe Feldstärke führt zu einer Stoßionisation und damit zu einer Entladung, welche in Form von sprühenden Funken sichtbar wird.
Beispiele dafür sind das *Elmsfeuer*, das bei hoher elektrischer Aufladung der Atmosphäre an metallischen Spitzen (z. B. Masten) auftreten kann.

Lackierungen

Beim Lackieren von Metallkörpern (z. B. Autos) ionisiert man den Luftstrom infolge einer Gasentladung. Die negativ geladenen Farbtröpfchen werden durch das angelegte Feld (die Spritzdüse ist negativ, das Metall ist positiv geladen) zum Metallteil gezogen. Aufgrund dieser Spritztechnik ist eine Minimierung des Farbverbrauches möglich (Abb. 95.1).



95.1 Minimierung des Farbverbrauches durch Ionisierung

Gewitter

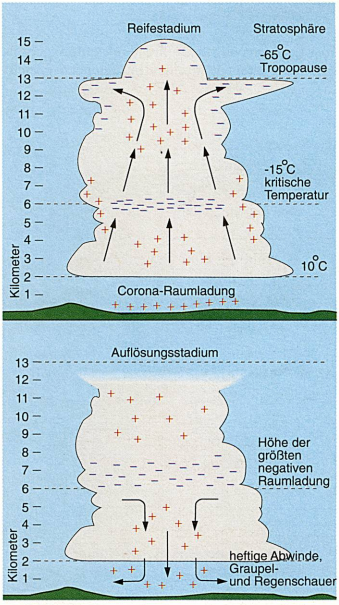
Ein Gewitter ist ein örtlich begrenzter Ausgleich elektrischer Spannungsdifferenzen zwischen Erde und Atmosphäre, welche von optischen und akustischen Erscheinungen begleitet wird. Pro Tag gibt es auf der Erde einige tausend Gewitter. Es gibt mehrere Gewittertheorien; gewisse Erscheinungen wie Kugelblitze können bis jetzt nicht befriedigend erklärt werden.

Die wichtigste Phase der Gewitterentstehung ist die weiträumige Trennung positiver und negativer elektrischer Ladungen. Messungen haben ergeben, daß eine Gewitterwolke nicht ein elektrischer Dipol ist, es tritt eine besondere Ladungsverteilung auf.

Ein Gewitter baut sich innerhalb von 20 Minuten auf. Voraussetzung für die Ausbildung einer Gewitterzelle ist labil geschichtete Luft mit hoher Luftfeuchtigkeit. Im Zentrum treten starke Aufwinde mit hohen Windgeschwindigkeiten auf.

In der voll augebildeten Gewitterwolke liegt der Bereich negativer Ladung in etwa 6 km Höhe bei –15 °C. Diese Schicht ist einige hundert Meter hoch. Der positiv geladene Abschnitt darüber reicht bis in eine Höhe von 13 km. An der Wolkenoberseite tritt eine dünne Schicht negativer Ladung auf. Die Unterseite der Wolke ist positiv geladen.

Die Ladungstrennung läßt sich durch folgende Hypothese erklären: Graupelkörner fallen durch einen Bereich schwebender Eiskristalle. Durch die Zusammenstöße kommt es zur Ladungstrennung. Dabei tritt das Phänomen der Ladungsumkehr auf. Erfolgen die Zusammenstöße unter –15 °C, werden die Graupeln positiv geladen, oberhalb dieser Temperatur negativ.



95.2 Reifestadium (oben) und Auflösungsstadium einer Gewitterwolke (unten)

7.3 Elektrizitätsleitung im Vakuum

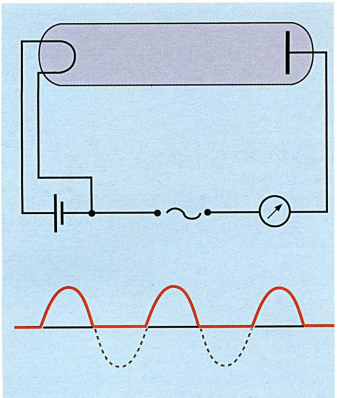
Elektronenstrahlröhre

Schon der glühelektrische Effekt hat gezeigt, daß aus einer Glühkatode Elektronen austreten, welche zur Anode hin beschleunigt werden. Die aus der Katode austretenden Elektronen werden auch als *Elektronenstrahlen* oder *Katodenstrahlen* bezeichnet. Die Katodenstrahlen sind in einer evakuierten Röhre nicht sichtbar.

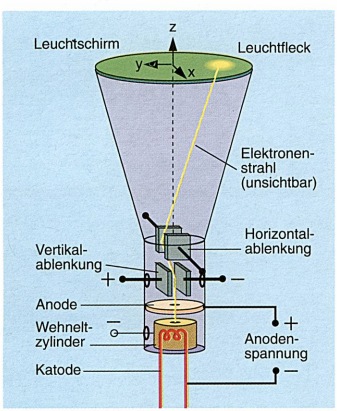
Röhrendiode

Eine Anwendung der Elektronenstrahlröhre ist die *Röhrendiode*. Da die Stromleitung von der einen Elektrode zur anderen nur bei bestimmter Polung möglich ist, kann mit Hilfe einer Röhrendiode ein Wechselstrom gleichgerichtet werden; es wird nur jede zweite Halbwelle durchgelassen (Abb. 96.1). Röhrendioden wurden früher als Gleichrichter in der Technik verwendet. Sie sind jedoch durch Halbleiterdioden fast vollständig verdrängt worden.

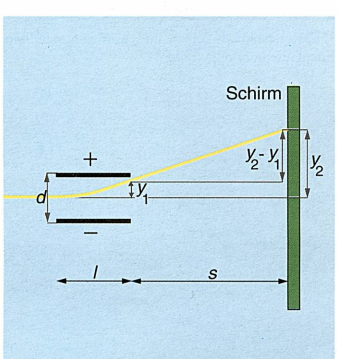
95.3 Der Linienblitz ist die häufigste Form der Entladung. Der Donner ist die durch den Blitz verursachte Explosionswelle.



96.1 Legt man an eine Röhrendiode eine Wechselspannung, erhält man einen pulsierenden Gleichstrom.



96.2 Schemabild der Braunschen Röhre



96.3 Ablenkung des Elektronenstrahls durch die y-Platten des Ablenksystems

Braunsche Röhre

Die Braunsche Röhre ist ein wesentlicher Bestandteil des Elektronenstrahloszilloskops und dient als Bildröhre im Fernsehapparat. Sie besteht aus einem hochevakuierten Glaskolben, in dessen Hals sich eine indirekt beheizte Katode und eine durchbohrte Anode befinden. Legt man eine Spannung an die Elektroden, werden die Elektronen im elektrischen Feld beschleunigt und fliegen durch die Anode hindurch auf den Leuchtschirm. Dieser ist mit einer fluoreszierenden Substanz versehen (Abb. 96.2).
Um die Helligkeit des Leuchtflecks zu verändern, verwendet man weiters eine zylinderförmige Elektrode, deren Potential gegenüber der Katode verändert werden kann. Man nennt diesen Bauteil auch *Wehneltzylinder*.
Mit Hilfe des *Fokussierungszylinders*, dessen Spannung variiert werden kann, wird der Elektronenstrahl gebündelt. Die elektrischen Feldlinien verlaufen so, daß sie auf die Elektronen die gleiche Wirkung haben wie eine Linse auf einen Lichtstrahl.
Das System Elektroden, Wehneltzylinder und Fokussierungszylinder wollen wir als *Elektronenkanone* bezeichnen.

Ist das Potential des Wehneltzylinders gegenüber der Katode negativ, so werden die Elektronen zum Teil zur Katode zurückgedrängt, die Intensität ändert sich. Erhöht man die negative Spannung, erreicht man schließlich das sogenannte Sperrpotential; der Elektronenstrahl wird unterdrückt.

Nach Verlassen der Elektronenkanone durchlaufen die Elektronen zwei senkrecht zueinander stehende Plattenkondensatoren, durch welche der Elektronenstrahl in x- und y-Richtung abgelenkt werden kann.

Ablenkung des Elektronenstrahls durch die y-Platten:

Man kann bei der Berechnung die Gewichtskraft des Elektrons vernachlässigen, da sie gegenüber der elektrischen Kraft vernachlässigbar klein ist.

Nach Verlassen der Elektronenkanone führt das Elektron zwischen den Platten zwei Bewegungen gleichzeitig durch:
- eine gleichförmige Bewegung zum Schirm hin (z-Richtung),
- eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung in Feldrichtung des Kondensators (y-Richtung).

Für die Strecke l (Abb. 96.3) benötigt ein Teilchen mit der Geschwindigkeit v_z die Zeit $t = \frac{l}{v_z}$. In dieser Zeit wird das Elektron durch das elektrische Feld vertikal die Strecke y_1 abgelenkt:

(1) $y_1 = \frac{a\,t^2}{2} = \frac{a\,l^2}{2\,v_z^2}$

Aus $F = m_e\,a$ und $F = e\,E$ kann man die Beschleunigung a bestimmen:

(2) $a = \frac{e\,E}{m_e}$

Für das homogene Feld gilt:

(3) $E = \frac{U}{d}$

(1), (2), (3) $y_1 = \frac{e\,U\,l^2}{2\,m_e\,d\,v_z^2}$

Nach dem Passieren des Kondensators bewegt sich das Elektron geradlinig mit gleichförmiger Geschwindigkeit weiter. Daher verhalten sich die Geschwindigkeiten in der y- und der z-Richtung wie die zurückgelegten Wege:

$$\frac{y_2 - y_1}{s} = \frac{v_y}{v_z} \Leftrightarrow y_2 = y_1 + \frac{v_y}{v_z}\,s$$

Daraus und aus $v_y = a\,t = \frac{e\,U\,l}{m_e\,d\,v_z}$ folgt:

$$y_2 = \frac{e\,U\,l^2}{2\,m_e\,d\,v_z^2} + \frac{s\,e\,U\,l}{m_e\,d\,v_z^2} = \frac{e\,l\,U\,(l+2\,s)}{2\,m_e\,d\,v_z^2}$$

Die kinetische Energie des Elektrons entspricht der Arbeit, welche an ihm verrichtet wird, wenn es die Potentialdifferenz U_b (Beschleunigungsspannung) zwischen Katode und Anode "durchfällt":

$$\frac{m_e\,v_z^2}{2} = e\,U_b \quad \Leftrightarrow \quad v_z^2 = \frac{2\,e\,U_b}{m_e}$$

Damit erhält man für die Ablenkung y_2 folgende Formel:

$$y_2 = \frac{l\,U\,(2\,s+l)}{4\,d\,U_b}$$

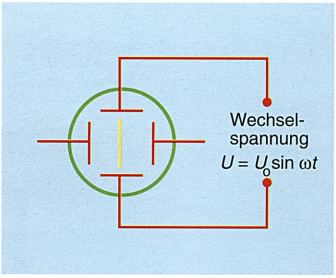
Wird nun Wechselspannung der Frequenz f an die y-Platten gelegt, bewegt sich der Elektronenstrahl mit dieser Frequenz f auf und ab (Abb. 97.1). Auf dem Schirm ist - wegen der Trägheit des Auges - ein leuchtender Strich zu sehen. Nur bei kleiner Frequenz kann man die Auf- und Abbewegungen des Strahles auch verfolgen. Um den zeitlichen Verlauf der Wechselspannung darzustellen, muß man an die x-Platten eine sogenannte *Zeitablenkspannung* legen (Abb. 97.2). Diese steigt von Null auf einen Höchstwert an und fällt dann auf Null zurück (Kippschwingung). Diese Spannung bewegt den Elektronenstrahl in horizontaler Richtung und zieht die Schwingungen auseinander.
Hat der Elektronenstrahl den äußersten Punkt erreicht, springt er aufgrund der Zeitablenkspannung an den Anfang zurück. Damit dieser Rücklauf nicht sichtbar wird, muß das Potential am Wehneltzylinder sperren. Man sagt, der Rücklauf wird dunkel getastet.
Neben der elektrostatischen Bündelung und Ablenkung gibt es auch eine magnetische. Dabei wird die Ablenkung eines Elektronenstrahls in einem Magnetfeld ausgenützt. Der Elektronenstrahl beschreibt bei der magnetischen Bündelung eine Schraubenbahn.

Röntgenröhre

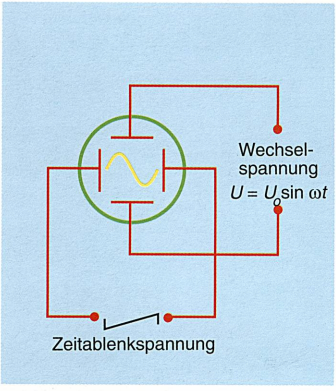
Eine Röntgenröhre besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in welchem zwei Metallelektroden eingeschmolzen sind. Die aus einer Glühkatode austretenden Elektronen werden durch eine Hochspannung (10^3 V - 10^6 V) beschleunigt. Treffen sie auf der Anode auf - sie besteht aus einem Metall mit hoher Atommasse (Wolfram, Molybdän, Kupfer ...) -, werden sie abgebremst. Der Großteil der kinetischen Energie wird in innere Energie umgewandelt, was zu einer Erwärmung der Anode führt. Die restliche Energie führt zu einer elektromagnetischen Strahlung, der Röntgenstrahlung. Dabei handelt es sich um eine sehr kurzwellige Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 10^{-13}m bis 10^{-8}m, welche eine hohe Energie aufweist.
Röntgenstrahlung besteht aus der *Bremsstrahlung* und der *charakteristischen Strahlung*. Die Bremsstrahlung entsteht direkt durch das Abbremsen der Elektronen. Die charakteristische Strahlung entsteht, wenn die Atome des Anodenmaterials zur Abgabe von Eigenstrahlung angeregt werden. Röntgenstrahlen können Materie durchdringen, fotografische Platten schwärzen und Gase ionisieren. Sie werden durch magnetische und elektrische Felder nicht beeinflußt. Beim Durchgang durch Materie wird die Intensität der Strahlung durch Absorption geschwächt. Je größer die Dichte einer Substanz bzw. je größer die Atommassen der am Aufbau der Substanz beteiligten Elemente sind, umso größer ist auch das Absorptionsvermögen. Das Fleisch eines Körperteils absorbiert nur sehr wenig, Knochen hingegen absorbieren wesentlich mehr Strahlung. Bei einer Röntgenaufnahme werden jene Teile des Films, welche von Knochen abgedeckt werden, kaum geschwärzt. Daher erscheinen die Knochen hell, das umgebende Fleisch dunkel.

Farbfernsehen

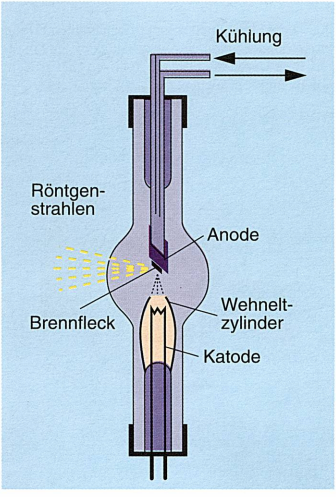
Die elektrischen Signale, die über Leitungen oder drahtlos in das Fernsehgerät gelangen, werden wieder in ein farbiges Bild umgewandelt. Über jeden Punkt des Bildes müssen die Informationen *Helligkeit*, *Farbton* und *Sättigung* bekannt sein.



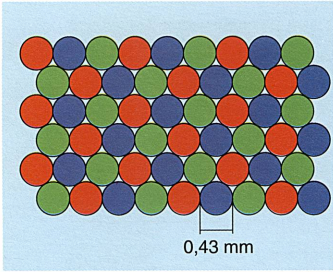
97.1 Wird an die y-Platten eine Wechselspannung gelegt, bewegt sich der Elektronenstrahl mit deren Frequenz auf und ab. Die Höhe des leuchtenden Striches beträgt 2 y_2.



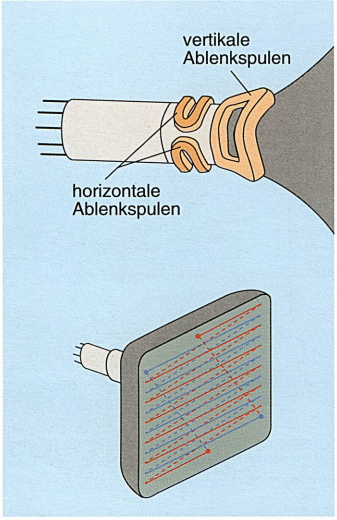
97.2 Durch eine Zeitablenkspannung wird die Schwingung auseinandergezogen. Man erkennt, daß an den y-Platten eine sinusförmige Wechselspannung liegt.



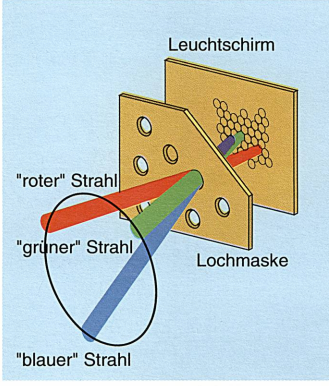
97. 3 Schema der Röntgenröhre



98.1 Farbscheibchen auf dem Bildschirm eines Farbfernsehgerätes.Durch die Farben Rot,, Grün und Blau werden alle Farbeindrücke erzeugt.



98.2 Die Ablenkung der Elektronenstrahlen erfolgt durch Magnetspulen, die außerhalb der Röhre montiert sind. Durch diesen Aufbau lassen sich größere Ablenkwinkel erreichen.



98.3 Schema der Dreistrahlröhre

Der Elektronenstrahl erzeugt auf der Leuchtschicht etwa 13 Millionen Punkte pro Sekunde. Um das Bildflimmern zu verhindern, verwendet man das *Zeilensprungverfahren*. Zuerst werden alle ungeradzahligen Zeilen, dann die geradzahligen Zeilen erzeugt. Es entstehen damit zwei Teilbilder, die ein Gesamtbild ergeben, wobei für ein Teilbild 1/50 s benötigt wird. Man erhält daher eine Bildfolge von 25 Bildern pro Sekunde.

Das Fernsehbild besteht aus 625 Zeilen mit je 800 Bildpunkten, also insgesamt aus 500 000 Elementen.

Farbfernsehen wird dadurch ermöglicht, daß durch additive Mischung der Primärfarben Rot, Grün und Blau jeder beliebige Farbeindruck erzeugt werden kann. Die Dreistrahlröhre enthält für jede Primärfarbe einen Elektronenstrahl. Diese Strahlen bringen die entsprechenden Flächen - rote, grüne und blaue Phosphorscheibchen - zum Leuchten (Abb. 98.1). Das Aufleuchten ist umso heller, je größer die Intensität des auftreffenden Elektronenstrahls ist. Aufgrund der Kleinheit dieser Farbpunkte können sie vom Auge nicht mehr getrennt wahrgenommen werden, sie werden additiv gemischt.

Im Bereich der Farbbildschirme gibt es neue Entwicklungen. Das sind Flüssigkeitskristallschirme, bei denen die einzelnen Bildpunkte über Transistoren angesteuert werden. Der Vorteil liegt in einer geringeren Leistungsaufnahme; außerdem gibt es kein Nachleuchten des Schirmes, wodurch eine schnellere Bildfolge möglich ist.

Aufnahmekameras haben die Aufgabe, das Bild des Aufnahmeobjektes in einzelne Bildpunkte zu zerlegen und für jeden Bildpunkt elektrische Signale der einfallenden Helligkeit, Farbe und Sättigung zu liefern. Im Empfänger werden die vom Sender übertragenen elektrische Impulse in Intensitätsschwankungen der Elektronenstrahlen umgewandelt.

Kontrollfragen

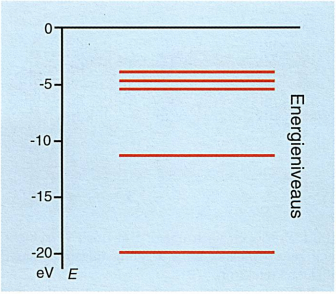
1. Wie erfolgt die Stromleitung in Gasen?
2. Was versteht man unter selbständiger und unselbständiger Gasentladung?
3. Erkläre den Vorgang der Glimmentladung.
4. Was versteht man unter "Plasma" bei der Glimmentladung?
5. Erkläre den glühelektrischen Effekt.
6. Wie kommt ein Lichtbogen zustande?
7. Beschreibe den Aufbau und die Wirkungsweise einer Leuchtstofflampe.
8. Wozu benötigt man UV-Strahlung?
9. Was sind Natriumdampflampen?
10. Warum treten an Spitzen Gasentladungen auf?
11. Was sind Elektronenstrahlen?
12. Wie ist eine Braunsche Röhre aufgebaut?
13. Wozu dient der Wehneltzylinder?
14. Erkläre die Aufgabe des Fokussierungszylinders.
15. Welche Aufgabe haben die Ablenkplatten?
16. Leite die Vertikalablenkung des Elektronenstrahls her.
17. Welche Ablenkmöglichkeiten gibt es für einen Elektronenstrahl?
18. Wie wird ein Fernsehbild aufgebaut?
19. Erkläre den Aufbau der Röntgenröhre.
20. Welche Eigenschaften besitzt Röntgenstrahlung?

7.4 Elektrizitätsleitung in Festkörpern. Halbleiter

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Festkörper bezüglich ihrer elektrischen Leitfähigkeit hängen unmittelbar mit der Art der chemischen Bindung zusammen. Zur Erklärung der Leitfähigkeit gibt es ein anschauliches Modell, das Energiebändermodell.

Energiebändermodell

Ein chemisches Element ist durch seine Ordnungszahl gekennzeichnet. Das ist die Anzahl der Kernladungen bzw. Elektronen, die jedes seiner Atome besitzt. Die Elektronen eines ungebundenen Atoms nehmen feste, scharf abgegrenzte Energieniveaus ein. Zwischenstufen sind nicht möglich. Die Bereiche zwischen den möglichen Energieniveaus werden als *verbotene Zonen* oder *Energielücken* bezeichnet (Abb. 99.1).

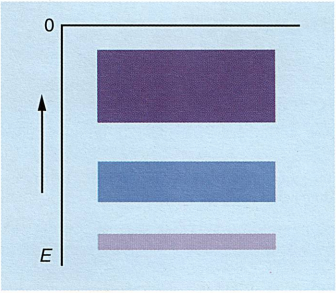


99.1 Mögliche Energieniveaus und verbotene Zonen

Zur *Anregung* eines Atoms wird Energie zugeführt. Bei diesem Vorgang werden Elektronen auf ein höheres Energieniveau gebracht. (Sie "überspringen" dabei verbotene Zonen.) Beim Zurückfallen wird die zugeführte Energie wieder abgegeben.

Die Elektronen der äußersten Schale eines Atoms heißen *Bindungs-* oder *Valenzelektronen*. Diese sind für die Bindung der Atome verantwortlich.

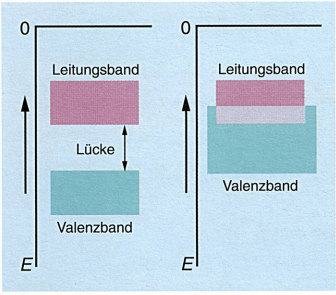
In einem Festkörper (und in Flüssigkeiten) haben die Atome einen sehr kleinen Abstand, der durch elektrostatische Kräfte bestimmt wird. Der Atomkern eines Atoms zieht auch die Elektronenhüllen der Nachbaratome an; die gleichnamig geladenen Atomkerne stoßen einander ab. Die Elektronenzustände eines Atoms werden von den elektrostatischen Feldern der benachbarten Atome stark beeinflußt. Die inneren Elektronen bleiben davon nahezu unberührt.



99.2 In Festkörpern und Flüssigkeiten sind die Energieniveaus zu Energiebändern verbreitert.

Valenzelektronen in einem Festkörper besitzen Energieniveaus, die von den komplexen elektrostatischen Verhältnissen bestimmt sind. Die Überlagerung der Felder bewirkt eine Verbreiterung der Niveaus, es bilden sich *Energiebänder* aus (Abb. 99.2). Jedes Band weist eine bestimmte maximale *Besetzungszahl* für Elektronen auf.

Die Energiebänder sind durch verbotene Zonen getrennt. Zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit sind die beiden äußersten Bänder von Interesse, das *Valenzband* und das darüberliegende leere *Leitungsband*. Bänder, die unterhalb liegen, sind meist vollständig mit Elektronen gefüllt. Ein Elektron kann darin nur dann seinen Platz wechseln, wenn ein Elektron eines anderen Atoms die entgegengesetzte Bewegung durchführt; sie tragen zur Leitfähigkeit nichts bei. Damit eine Stromleitung in einem Festkörper möglich ist, muß ein nicht vollständig besetztes Band vorhanden sein.



99.3 Energiebändermodell von Nichtleiter und Leiter

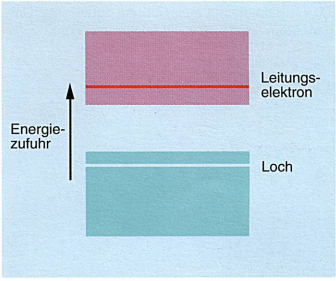
Bei einem *Nichtleiter* ist der energetische Abstand zwischen dem vollständig besetzten Valenzband und dem leeren Leitungsband so groß, daß er von den Elektronen nicht mehr übersprungen werden kann (Abb. 99.3 links). In einem *Leiter erster Klasse* (Metall) kommt es zu einer Überlappung von Valenzband und Leitungsband (Abb. 99.3 rechts). Ein Teil der Elektronen gehört damit nicht zu einem bestimmten Atom, sondern zum ganzen Metall. Dies führte auch zur Vorstellung des *Elektronengases* in einem metallischen Leiter, in welchem sich die *freien* Elektronen ähnlich wie Gasteilchen verhalten.

Die Eigenleitung bei Halbleitern

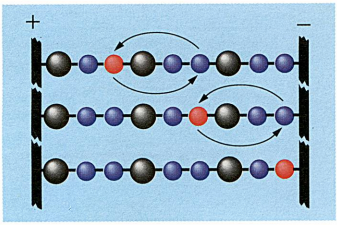
Halbleiter sind Stoffe, die einen kristallinen Aufbau aufweisen, z. B. Silizium und Germanium. Die elektrischen Eigenschaften werden wesentlich von der Reinheit bestimmt. Fremdatome in einem Halbleitermaterial verändern die Leitfähigkeit wesentlich.
Ein Phänomen reiner Halbleiter ist die *Eigenleitung*.

Eigenleitung

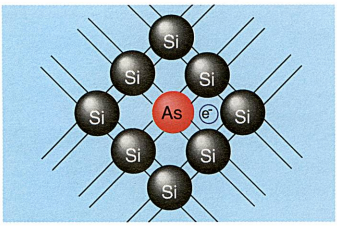
Die Valenzelektronen in einem Halbleiter sind locker gebunden. Durch Zufuhr von Energie in Form von Wärme oder Strahlung können sie über die verbotene Zone ins Leitungsband gehoben werden (Abb. 99.4): Sie werden zu *Leitungselektronen*. Dadurch entstehen *Löcher* im Valenzband. Die Elektro-



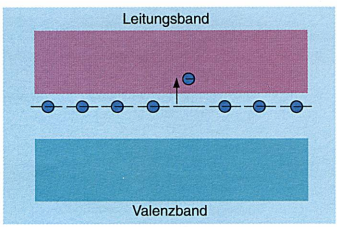
99.4 Bändermodell eines Halbleiters



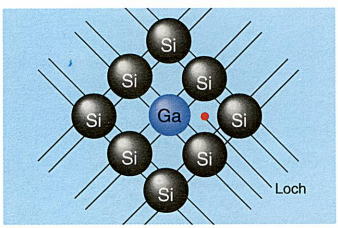
100.1 Von oben nach unten: Ein Loch verschiebt sich zum Minuspol hin – Ladungstransport durch ein Defektelektron.



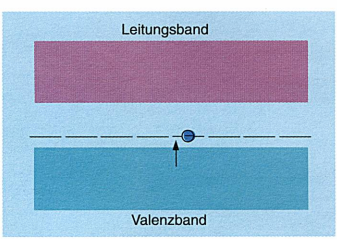
100.2 Siliziumkristall mit Arsen dotiert: Das Arsen-Atom liefert ein Leitungselektron.



100.3 Energiebändermodell eines n-Leiters



100.4 Siliziumkristall mit Gallium dotiert: Das Gallium-Atom liefert ein Defektelektron (Loch).



100.5 Energiebändermodell eines p-Leiters

nen benachbarter Atome haben die Tendenz, sich dorthin zu bewegen und in die vorhandenen Löcher zu "fallen". Dadurch entstehen an den von Elektronen verlassenen Gitterplätzen neue Löcher (Abb. 100.1). Um die Stromleitung in Halbleitern erklären zu können, ordnet man den Löchern auch einen Teilchencharakter zu und bezeichnet sie als positiv geladene *Defektelektronen.* Das gleichzeitige Entstehen eines frei beweglichen Elektrons und eines Lochs durch Aufreißen einer Gitterbindung wird als *Ladungsträgergeneration* oder *Paarbildung* bezeichnet. Durch diesen Vorgang entstehen Leitungselektronen und gleich viele Defektelektronen. Bei 20 °C gelangen bereits so viele Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband, daß reine Halbleiter bei Zimmertemperatur bereits schwach leitend sind. Bei Silizium erhält man bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C eine Verdreifachung der Leitfähigkeit.
Fängt ein Loch ein Leitungselektron ein, verschwinden beide Ladungsträger; aus dem freien Elektron ist ein Valenzelektron geworden. Man bezeichnet diesen Vorgang als *Rekombination.* Bei thermodynamischem Gleichgewicht sind Paarbildung und Rekombination gleich groß.
Wird an einen Halbleiter eine Spannung angelegt, wandern die Leitungselektronen zum Plus- und die Defektelektronen zum Minuspol. Diesen Ladungstransport durch Leitungs- und Defektelektronen bezeichnet man als *Eigenleitung* des Halbleiters.

Reine Halbleiter leiten bei Zimmertemperatur den elektrischen Strom. Der spezifische Widerstand sinkt mit steigender Temperatur.

Störstellenleitung

In reinen Halbleitern ist die Anzahl der im Leitungsband verfügbaren Elektronen gleich der Anzahl der Löcher.

Die häufigsten Halbleiterelemente sind Silizium (Si) und Germanium (Ge), welche vierwertig sind; das heißt, sie besitzen vier Valenzelektronen. Werden in diese Stoffe Fremdatome eingebaut, ändert sich das Leitungsverhalten. Man bezeichnet diesen Einbau als *Dotierung.*

n-Leitung

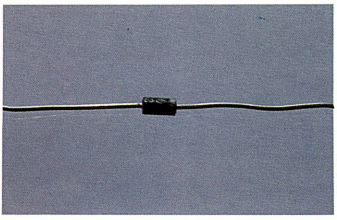
Dotiert man einen Siliziumkristall mit Atomen eines fünfwertigen Elementes, z. B. Arsen (As), ist das fünfte Valenzelektron nur sehr schwach an den Atomkern gebunden (Abb. 100.2). Dadurch entsteht eine Energiestufe, welche knapp unter dem Leitungsband liegt. Es bedarf somit nur einer geringen Energie (Zimmertemperatur), um die Elektronen von dieser Stufe in das Leitungsband zu heben (Abb. 100.3).
Das Arsen wird als *Donator* (Elektronenspender) bezeichnet. Den Leitungsvorgang nennt man *n-Leitung*; n steht für "negative Teilchen", also Elektronen. Sowohl Leitungslektronen als auch Defektelektronen wirken an der Stromleitung mit, doch überwiegt der Ladungstransport durch Elektronen.

p-Leitung

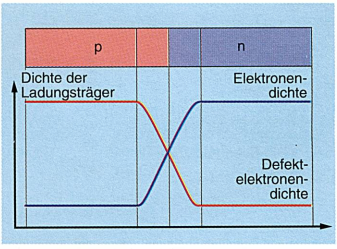
Erfolgt die Dotierung des Si-Kristalls mit einem dreiwertigen Element, z. B. Gallium (Ga), fehlt ein Elektron für die Bindung mit einem Si-Atom (Abb. 100.4). Es bleibt ein Loch, durch welches ein Valenzelektronen eines benachbarten Atoms eingefangen werden kann; dadurch wird ein neues Defektelektron gebildet.
Durch die Dotierung entsteht ein Energieband, welches energetisch knapp oberhalb des Valenzbandes liegt (Abb. 100.5). Bereits bei Zimmertemperatur werden Elektronen auf das neue unbesetzte Energieniveau gehoben, wodurch im Valenzband ein Defektelektron (Loch) entsteht, welches den Ladungstransport bewirkt.
Gallium wird als *Akzeptor* (Elektronenaufnehmer) bezeichnet. Den Leitungsvorgang nennt man p-Leitung; p steht für "positive Teilchen", also Defektelektronen. Sowohl Leitungselektronen als auch Defektelektronen wirken an der Stromleitung mit, doch überwiegt der Ladungstransport durch Defektelektronen.

Ohne äußere Einflüsse erfolgt die Bewegung der Leitungselektronen und Defektelektronen gleichmäßig über einen Kristall verteilt. Legt man eine äußere Spannung an, entsteht eine geordnete Bewegung, der elektrische Strom.
Bei höheren Temperaturen werden Störstellenleitung und Eigenleitung wirksam. Die Leitfähigkeit ändert sich dabei nicht linear, sondern exponentiell.
Die überwiegenden Ladungsträger in einem dotierten Halbleiter werden *Majoritätsträger* genannt, die in geringerer Anzahl vorhandenn *Minoritätsträger*.

In einem n-Halbleiter sind die Majoritätstäger Elektronen, die von den Donatoren und der Paarbildung stammen. Die Minoritätsträger sind die Defektelektronen aus der Paarbildung. In einem p-Halbleiter werden die Majoritätsträger von den Defektelektronen gebildet, die von den Akzeptoren und der Paarbildung stammen. Die Minoritätsträger sind die Leitungselektronen aus der Paarbildung.



101.1 Eine Halbleiterdiode

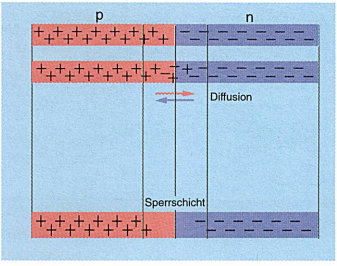


101.2 Eine Halbleiterdiode besteht aus einem p-Leiter und einem n-Leiter. Das Diagramm stellt den Verlauf der Ladungsträgerdichten im pn-Übergang dar.

Diode

pn-Übergang

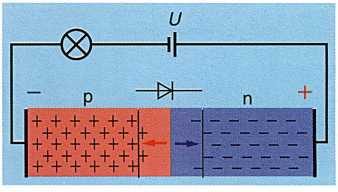
In einer *Diode* grenzen ein p- und ein n-leitendes Gebiet aneinander und bilden einen *pn-Übergang*. Aus der an den pn-Übergang angrenzenden n-Schicht diffundieren freie Elektronen in die p-Schicht und rekombinieren mit den Defektelektronen in der Grenzschicht. Dadurch verbleiben in der Randzone des n-Leiters die fest im Gitter gebundenen Donatoren, die ihre Ladung nicht mehr durch Elektronen kompensieren können, wodurch sich in diesem Teil eine positive Raumladung ausbildet.
In gleicher Weise diffundieren Defektelektronen aus der Randzone der p-Schicht in die n-Schicht und bewirken damit die Ausbildung einer negativen Raumladung. Aufgrund dieser Diffusionsvorgänge, deren Ursachen die innere Energie und das Konzentrationsgefälle der Ladungsträger am pn-Übergang sind, ensteht auf beiden Seiten des pn-Übergangs eine dünne, an Ladungsträgern verarmte *Sperrschicht* (Abb. 101.3). Die Folge dieser Raumladungen ist ein elektrisches Feld, welche die Elektronen ins n-Gebiet und die Defektelektronen ins p-Gebiet zurückdrängt. Im Gleichgewichtszustand heben einander die Wirkungen von Diffusion und elektrischem Feld auf.



101.3 Diffusion der Elektronen und der Defektelektronen. Das elektrische Feld verhindert eine weitere Diffusion. Es entsteht eine Sperrschicht.

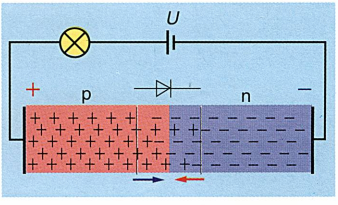
Versuch
An eine Diode wird eine Gleichspannung von 5 V gelegt, und zwar so, daß die n-Seite am Pluspol und die p-Seite am Minuspol liegt. Eine in Serie geschaltete Glühlampe leuchtet nicht (Abb. 101.4).

Erklärung:
Bei dieser Polung wird das elektrische Feld im pn-Übergang verstärkt. Die beweglichen Ladungsträger werden vom pn-Übergang zurückgedrängt, die Sperrschicht wird breiter. Über den pn-Übergang fließt bei dieser Polung nur sehr geringer Strom, der *Sperrstrom*. Dieser setzt sich bei geringer Spannung aus zwei Teilen zusammen:
- Im p-Gebiet vorhandene Elektronen und im n-Gebiet vorhandene Defektelektronen geraten aufgrund der Diffusion in das elektrische Sperrschichtfeld und gelangen so auf die andere Seite.
- Durch Energiezufuhr von außen (z.B. Wärme) kommt es zur Bildung von Ladungsträgerpaaren (Eigenleitung), welche durch das Sperrschichtfeld getrennt sind. Sie gelangen dann in jenes Gebiet, in welchem sie in Überzahl vorhanden sind.
Mit wachsender Spannung verringert sich der Diffusionsstrom der Majoritätsträger, der Sperrstrom wird dann fast nur von den Minoritätsträgern der Eigenleitung gebildet.Da der Sperrstrom bei geeigneten Betriebsbedingungen sehr klein ist, ist die Diode bei dieser Polung ein großer Gleichstromwiderstand.

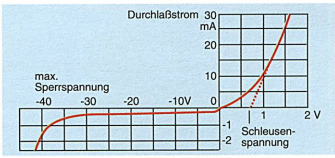


101.4 Die Diode ist in Sperrichtung gepolt.

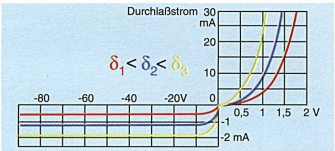
Versuch
An eine Diode wird eine Gleichspannung von 5 V gelegt, und zwar so, daß die n-Seite am Minuspol und die p-Seite am Pluspol liegt. Eine in Serie geschaltete Glühlampe leuchtet (Abb. 101.5).



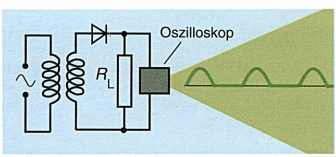
101.5 Die Diode ist in Durchlaßrichtung gepolt.



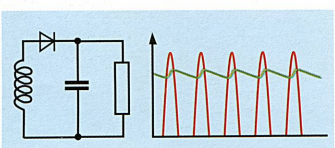
102.1 Kennlinie einer (idealen)Diode. Wird die maximale Sperrspannung überschritten, kann die Diode zerstört werden.



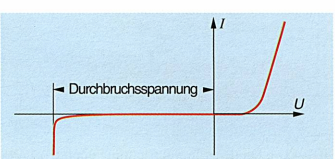
102.2 Die Kennlinie einer Diode ist temperaturabhängig.



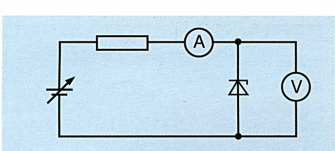
102.3 Die Diode als Gleichrichter: Sie liefert eine pulsierende Gleichspannung.



102.4 Mit dieser Schaltung läßt sich eine Verbesserung der Gleichrichtung erzielen. Der Kondensator wird auf den Spitzenwert der pulsierenden Spannung aufgeladen. Sperrt die Diode während der folgenden Halbperiode, kommt es zu einer geringen Entladung des Kondensators über den Lastwiderstand. In der nächsten Halbperiode wird der Kondensator wieder bis zum Spitzenwert geladen.



102.5 Kennlinie einer Zenerdiode



102.6 Schaltbild zur Ermittlung der Durchbruchsspannung einer Zener-Diode

Erklärung:
Mit wachsender Spannung erfolgt eine Überflutung des pn-Übergangs mit Majoritätsträgern. Die Leitungselektronen wandern zum Pluspol, die Defektelektronen zum Minuspol. Der pn-Übergang wird schmäler, der Strom steigt mit zunehmender Spannung an. Der Strom der Minoritätsträger kann jenen der Majoritätsträger nicht mehr kompensieren. Man sagt, die Diode ist auf *Durchlaß* gepolt. Aus den beiden Versuchen ist ersichtlich, daß eine Diode wie ein Ventil wirkt.

Die Kennlinie einer Diode gibt die Stromstärke in Abhängigkeit von der angelegten Spannung an (Abb. 102.1). Die Stromstärke steigt im positiven Bereich ab einer bestimmten Spannung exponentiell an; man bezeichnet diese als *Schleusenspannung*. Sie dient der Überwindung der Diffusionsspannung. Diese beträgt bei Silizium etwa 0,5 – 0,8 V, bei Germanium 0,2 – 0,5 V. Im negativen Bereich fließt nur der Sperrstrom, welcher vom Querschnitt der Sperrschicht abhängig ist.

Die Durchlaßrichtung einer Diode wird auch als Vorwärtsrichtung, die Sperrichtung als Rückwärtsrichtung bezeichnet. Bei der idealen Diode wird vorausgesetzt, daß die an den pn-Übergang anschließenden Halbleiterzonen widerstandsfrei sind, sodaß es dort keinen Spannungsabfall gibt. Bei realen Dioden treten sogenannte Bahnwiderstände auf.

Die Kennlinie einer Diode ist temperaturabhängig (Abb. 102.2). Durchlaßrichtung: Mit steigender Temperatur erhält man einen bestimmten Durchlaßstrom schon bei einer kleineren Durchlaßspannung. Pro 1 °C Temperaturzunahme nimmt bei Siliziumdioden die Spannung um 2 mV ab. Sperrichtung: Die Sperrstromstärke nimmt mit steigender Temperatur zu. Bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C verdoppelt sich die Sperrstromstärke.

Eine Diode besitzt einen pn-Übergang, dessen Eigenschaften durch die Richtung des angelegten elektrischen Feldes bestimmt werden.

Gleichrichterdiode

Versuch

Es wird eine Schaltung aus Spannungsquelle, Halbleiterdiode, Widerstand und Oszilloskop aufgebaut (Abb. 102.3). Die sinusförmige Wechselspannung wird entweder von einem Netzgerät oder von einem Transformator entnommen. Der Spannungsverlauf wird mittels eines Oszilloskops sichtbar gemacht. Auf dem Bildschirm erscheinen nur die positiven Halbperioden der Wechselspannung. In diesem Versuch ist die Diode in rascher Folge einmal in Durchlaßrichtung, einmal in Sperrichtung gepolt.
Ein wichtiges Anwendungsgebiet für Dioden ist die Umformung von Wechselspannung in pulsierende Gleichspannung.

Zenerdiode

Eine Z(ener)-Diode ist eine Halbleiterdiode, welche bei Betrieb in Sperrichtung besondere Eigenschaften aufweist (Abb. 102.5).

Versuch

Eine Z-Diode ist in einen Stromkreis mit einem Widerstand, einem Amperemeter und einem Voltmeter so geschaltet, daß sie in Sperrichtung betrieben wird (Abb. 102.6). Die Spannung wird langsam von 0 an gesteigert. Bei etwa 5 V beginnt die Stromstärke stark anzusteigen. Geringe Spannungserhöhung bewirkt eine große Erhöhung der Stromstärke.

Erklärung:
Die Spannung, bei welcher die Stromstärke steil zu steigen beginnt, wird als *Durchbruchspannung* bezeichnet. Für den Durchbruch gibt es zwei Ursachen:
- den *Zenereffekt*

Bei Anstieg der Spannung an der in Sperrichtung gepolten Diode erhöht sich die Feldstärke an der Sperrschicht, da an den gut leitenden p- und n-Schichten fast kein Spannungsabfall eintritt. Bei diesen Feldstärken werden chemische

Bindungen aufgebrochen. So gelangen Elektronen vom Valenz- ins Leitungsband. Dies bewirkt eine Verstärkung des Stromflusses. Hoch dotierte Dioden haben sehr dünne Sperrschichten, wodurch sie kleine Durchbruchspannungen aufweisen.

- *den Avalancheeffekt* (Lawineneffekt)
Oberhalb einer Sperrspannung von 7 V und vor allem bei schwach dotierten Dioden können Ladungsträger eine so hohe Energie annehmen, daß sie durch Stoß weitere Ladungsträger freisetzen. Es findet eine Stoßionisation statt, wodurch sich der Stromfluß lawinenartig erhöht. Diesem Effekt wirkt die thermische Bewegung der Gitterbausteine entgegen.

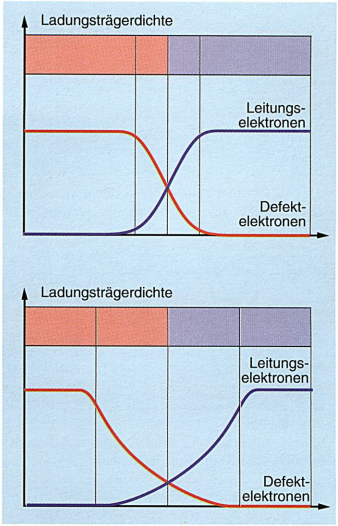
Die Lage des Durchbruchbereiches hängt von der Dotierung der Diode ab. Der Dioden-Sperrstrom wird durch die höchstzulässige Sperrschichttemperatur begrenzt. Sie liegt zwischen 150 °C und 180 °C. Wird dieser Temperaturbereich überschritten, wird die Diode meist zerstört.
Da zu einer großen Änderung der Stromstärke eine kleine Spannungsänderung gehört, eignet sich die Z-Diode zur Spannungsstabilisierung.

Kapazitätsdiode
Sie wird auch als *Varaktor* bezeichnet. Die Kapazitätsdiode ist eine Diode mit großflächigem pn-Übergang, die in Sperrichtung gepolt ist. Dabei bilden sich am pn-Übergang Raumladungen aus, wobei einer positiven Raumladung eine negative gegenüberliegt. Die beiden Ladungswolken haben die Wirkung eines Kondensators. Die Sperrschicht besitzt daher eine Kapazität. Wird nun die Spannung an der Diode erhöht, verbreitert sich die Sperrschicht, außerdem sinkt die Konzentration der Ladungsträger in den beiden Raumladungen wegen der erhöhten Rekombination. Als Folge davon verringert sich die Kapazität der Sperrschicht (Abb. 103.1). Das Ersatzschaltbild für diese Diode ist eine Serienschaltung eines Kondensators mit einem Ohmschen Widerstand. Die Kapazitätsdiode dient zur Abstimmung von Schwingkreisen in Empfangs- und Sendeeinrichtungen, zur Senderabstimmung in Rundfunkgeräten.

Fotodiode
Dabei wird der *innere lichtelektrische Effekt* oder *innere Fotoeffekt* angewendet. Trifft eine Strahlung auf einen lichtdurchlässigen Halbleiter, werden ab einer bestimmten Frequenz, der *Grenzfrequenz*, Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband gehoben. Dadurch wird der Sperrstrom vergrößert. Die Stromstärke ist proportional zur Beleuchtungsstärke.
Wird ein empfindliches Galvanometer an eine Fotodiode ohne Spannungsquelle geschlossen, zeigt es einen Stromfluß an. Dies ist dann möglich, wenn Licht auf den pn-Übergang fällt. Die von der Strahlung freigesetzten Elektronen werden durch das vorhandene elektrische Feld in den n-Bereich, die Defektelektronen in den p-Bereich gezogen; es fließt ein *Fotostrom.*

Lumineszenzdiode
Die Lumineszenzdioden werden häufig auch als *Leuchtdioden* (LED) bezeichnet. Sie werden für Anzeigeeinrichtungen verwendet, z. B. bei Meßgeräten, Uhren, Autos usw.
Bei Anlegen einer äußeren Spannung in Durchlaßrichtung erfolgt eine Rekombination von Leitungselektronen und Defektelektronen, wodurch es zu einer Energieabgabe kommt (Abb. 103.3). Es wird elektromagnetische Strahlung abgegeben. Soll die Strahlungsemission im sichtbaren Bereich erfolgen, muß die Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband größer als 1,8 eV sein.
Rotlichtdioden bestehen aus einem Galliumarsenid-Kristall mit einem Phosphoranteil.

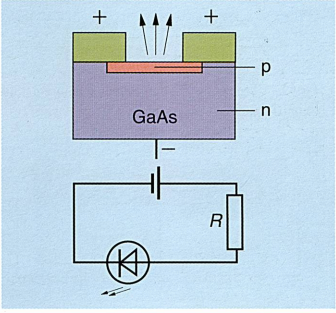
Laserdiode
Das Wort *Laser* setzt sich aus den Anfangsbuchstaben des Ausdrucks "Light amplification by stimulated emission of radiation" (= Lichtverstärkung durch angeregte Strahlungsemission) zusammen.
Die Laserdiode ist eine spezielle Lumineszenzdiode. Die einfachste Form eines Halbleiterlasers ist ein pn-Übergang in einem Halbleiterkristall, dessen



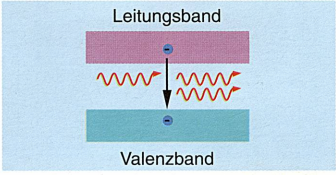
103.1 Elektronen- und Defektelektronendichte bei kleiner und bei großer Sperrspannung an einer Kapazitätsdiode

- Belichtungsmesser: Die Fotostromstärke ist ein Maß für die Beleuchtungsstärke.
- Sonnenbatterie: Viele zusammengeschaltete Fotoelemente können als Stromquelle wirken. (Das Problem dieser Energiegewinnung liegt momentan in den hohen Materialkosten und im geringen Wirkungsgrad.)
- Lichtschranken

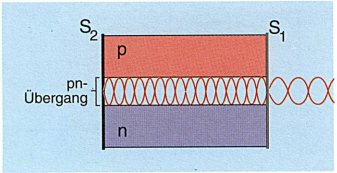
103.2 Anwendungen der Fotodiode



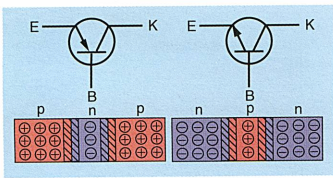
103.3 Schemadarstellung einer Leuchtdiode (oben), Schaltzeichen einer Leuchtdiode (unten)



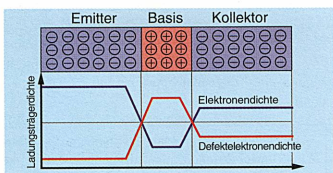
103.4 Stimulierte Emission



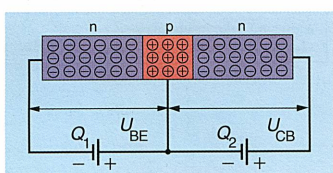
104.1 Zwischen den Spiegeln bildet sich eine stehende Welle aus. Als Halbleiter verwendet man Galliumarsenid.



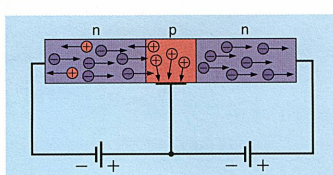
104.2 pnp-Transistor (links) und npn-Transistor (rechts), jeweils mit Schaltzeichen



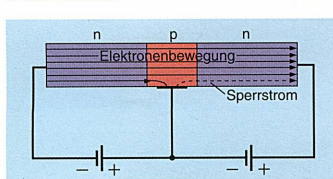
104.3 Leitungselektronen- und Defektelektronendichte in einem npn-Transistor



104.4 Ein Transistor wird mit zwei Spannungsquellen betrieben.



104.5 Die Leitungselektronen gelangen vom Emitter zum Kollektor.



104.6 Etwa 99 % des Emitterstromes gelangen zum Kollektor, etwa 1 % fließt an der Basis ab.

Endflächen eben und parallel sind. Der pn-Übergang emittiert Licht unter dem Einfluß einer angelegten Spannung, wenn es zu einer Rekombination der Leitungselektronen und der Defektelektronen kommt. Voraussetzung für das Entstehen von Laserlicht ist die *stimulierte Emission*: Diese findet statt, wenn ein Photon mit genau der Energie, welche der Energielücke zwischen Valenz- und Leitungsband entspricht, auf ein Elektron im Leitungsband trifft. Das Photon veranlaßt dieses Elektron zum Übergang aus dem Leitungs- in das Valenzband. Dabei gibt es Energie in Form eines weiteren Photons ab (Abb. 103.4). Bei diesem Vorgang stimmen Energie und Phase von einfallendem und emittierten Photon überein (*kohärentes Licht*).

Die beiden Endflächen des Halbleiterkristalls bilden Spiegel. Der eine reflektiert Licht vollständig, der andere teilweise. Sie reflektieren die Photonen, die beim Durchqueren des pn-Übergangs zu einem lawinenartigen Ansteigen der stimulierten Emission führen. Es kommt zu einer Verstärkung des Lichtes; allerdings nur dann, wenn sich zwischen den Spiegeln eine stehende elektromagnetische Welle ausbilden kann. Dies ist der Fall, wenn der Abstand zwischen den Spiegeln ein Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt. Jene Photonen, die durch den halbdurchlässigen Spiegel austreten, bilden das Laserlicht (Abb. 104.1). Laserdioden werden aufgrund ihrer geringen Größe in vielen Bereichen angewendet, z.B. in CD-Plattenspielern.

Transistoren

Das Wort "Transistor" ist aus dem englischen Begriff *Trans*fer Re*sistor* (veränderlicher Widerstand) gebildet. Der Transistor wude 1948 von *John Bardeen* und *Walter Brattain* erfunden, die physikalischen Vorgänge wurden von *William Shockley* erforscht.

Ein *Bipolartransistor* oder *Flächentransistor* besteht aus zwei Dioden, die in der Reihenfolge pnp oder npn in Serie geschaltet sind (Abb. 104.2). Die eine äußere Schicht heißt *Kollektor*, die andere *Emitter*, die Zwischenschicht wird *Basis* genannt.

Die Schichtdicke der Basis beträgt höchstens einige µm; meist wird sie aus anschaulichen Gründen im Verhältnis zu den anderen Schichten breiter gezeichnet.

Emitter- und Kollektoranschluß sind nicht vertauschbar, da der Emitterbereich stärker dotiert ist als der Kollektorbereich. Wird umgepolt, ändern sich die Eigenschaften des Transistors.

Ein Transistor ist ein elektrisches Bauelement mit drei Anschlüssen: Emitter, Basis und Kollektor.

Die Eigenschaften eines bipolaren Transistors werden im folgenden am *npn-Transistor* erläutert. Für den pnp-Transistor gelten analoge Überlegungen.

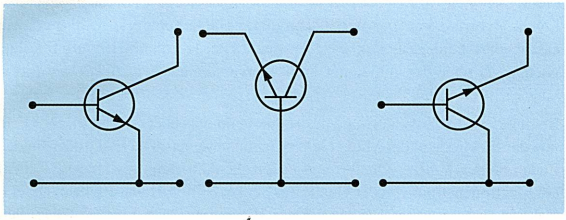
Der Transistor wird mit zwei Spannungsquellen betrieben (Abb. 104.4). Die Quelle Q_1 ist so gepolt, daß die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung liegt, die Quelle Q_2 derart, daß die Basis-Kollektor-Diode in Sperrichtung betrieben wird. Q_1 liefert die Spannung U_{BE}, Q_2 die Spannung U_{CB}.

Nun betrachten wir die Verhältnisse am npn-Transistor bei gleichzeitiger Einwirkung beider Spannungen:

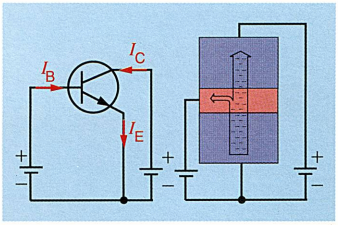
Die linke in Durchlaßrichtung betriebene Diode emittiert Leitungselektronen in die Basis Es fließt der Emitterstrom. Da die Bais sehr dünn und schwach dotiert ist, rekombiniert nur ein Bruchteil der in die Basis injizierten Elektronen mit den hier vorhandenen Defektelektronen (Abb. 104.5).

Der größte Teil des Elektronenstroms erreicht nun aufgrund der Diffusion das Kollektorrandgebiet. Dort werden die Elektronen aufgrund des Sperrfeldes zum Kollektor hin beschleunigt und von diesem aufgenommen. Zu dem vom Emitter verursachten Kollektorstrom kommt noch ein kleiner zwischen Basis und Kollektor fließender Sperrstrom (Abb. 104.6).

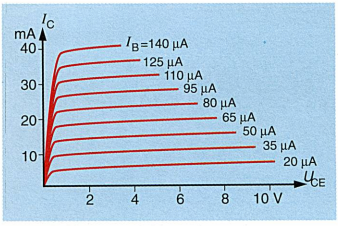
Eine Schaltung eines Transistors wird als *Basisschaltung* bezeichnet, wenn der Kontakt beider Stromkreise die Basis ist. Analog dazu gibt es eine *Emitterschaltung* und eine *Kollektorschaltung*.



105.1 Emitter-, Basis- und Kollektorschaltung (npn-Transistor)



105.2 npn-Tansistor in Emitterschaltung. Der Emitterstrom I_E ist die Summe aus Basisstrom I_B und Kollektorstrom I_C.



105.3 Kennlinienfeld eines npn-Transistors in Emitterschaltung

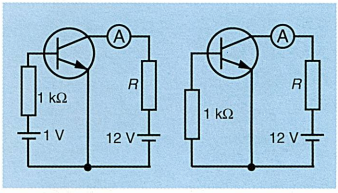
Kennlinienfeld

Wir betrachten im folgenden die Emitterschaltung eines npn-Transistors (105.2). Die Betriebsdaten eines Transistors erhält man aus dem *Kennlinienfeld* (Abb. 105.3). Jede Kennlinie gibt die Abhängigkeit des Kollektorstromes von der Kollektor-Emitterspannung bei einem bestimmten Basisstrom an. Dieser wird durch Spannung zwischen Basis und Emitter bestimmt. Ist diese Spannung Null, sperrt der Transistor. Erhöht man die Spannung, können die Elektronen die Basis durchlaufen und gelangen zum Kollektor; es fließt Kollektorstrom.
Es kann mit Hilfe eines geringen Basisstromes (z. B. 20 µA) ein großer Kollektorstrom (z. B. 5000 µA = 5 mA) gesteuert werden.
Für den Transistor gibt es verschiedene Anwendungsmöglichkeiten.

Der Transistor als Schalter

Versuch

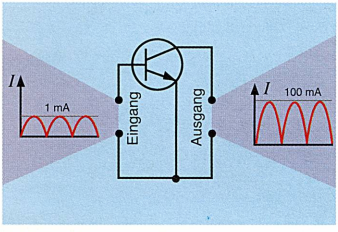
Ein npn-Transistor wird mit zwei Spannungsquellen verbunden, wie in Abb. 105.4 links dargestellt. Beträgt die Basisspannung ungefähr 1 V, verhält sich der Transistor wie ein geschlossener Schalter. Der Kollektorstrom wird durch den Widerstand *R* begrenzt. Senkt man die Basisspannung auf Null, fließt kein Strom über den Widerstand *R*, der Transistor sperrt. Es besteht dann eine Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor. Der Transistor verhält sich wie ein geöffneter Schalter.
Ein Transistor kann als Schalter verwendet werden. Es können pro Sekunde einige Millionen Schaltvorgänge durchgeführt werden. Diese Eigenschaft wird auch in der Computertechnik angewendet, um zwei Zustände (0 und 1) darzustellen.



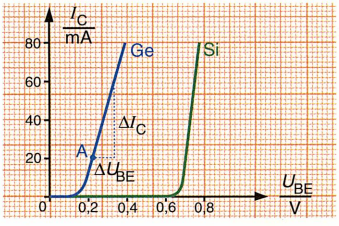
105.4 Transistor als Schalter. Senkt man die Basisspannung auf Null, fließt kein Kollektorstrom mehr.

Der Transistor als Verstärker

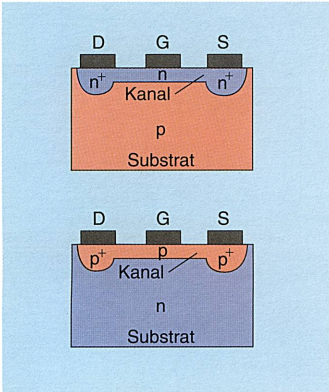
Ein Verstärker besitzt eine Eingangsspannung (einen Eingangsstrom) und eine Ausgangsspannung (einen Ausgangsstrom). Die Verstärkerwirkung bezieht sich auf Spannung, Stromstärke und Leistung. Aus einer kleinen Leistung am Eingang entsteht eine große Leistung am Ausgang. Dies ist durch Verstärkung der Stromstärke und/oder der Spannung möglich.
Ein Beispiel: Das Eingangssignal sei ein pulsierender Gleichstrom, welcher verstärkt werden soll (Abb. 105.5). Die Eingangsspannung an der Basis steuert den Kollektorstrom: Er pulsiert im Takt der Eingangsspannung. Das Eingangssignal wird dabei verstärkt, denn kleine Schwankungen des Basisstromes (der Eingangsspannung) haben große Schwankungen des Kollektorstromes zur Folge (Abb. 105.6).
Die *Stromverstärkung* gibt dabei das Verhältnis von Kollektorstromstärke zur Basisstromstärke an. Weiters treten eine *Spannungsverstärkung* und eine *Leistungsverstärkung* auf. Dazu ein Beispiel:
Stromverstärkung: 10- bis 200fach
Spannungsverstärkung: 100- bis 3000fach
Leistungsverstärkung: 1000- bis 60 000fach



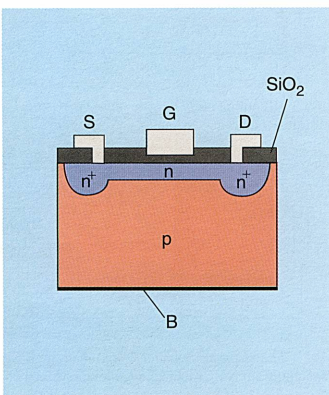
105.5 Der Transistor als Verstärker



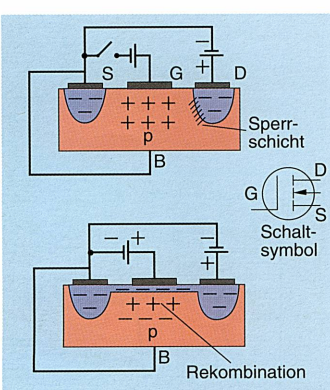
105.6 Steuerkennlinie eines Silizium- und eines Germanium-Transistors



106.1 n-Kanal-FET und p-Kanal-FET



106.2 Der MOS-FET besitzt 4 Anschlüsse: Source, Drain, Gate und Bulk.



106.3 Anreicherungstyp. *Oben:* Ohne Gate-Spannung hat sich kein Kanal ausgebildet. *Unten:* Bei angelegter Gate-Spannung bildet sich eine dünne Schicht mit Leitungselektronen aus.

Unipolare Transistoren

Bei unipolaren Transistoren erfolgt der Ladungstransport im wesentlichen durch Ladungsträger einer einzigen Polarität, entweder durch Leitungs- oder durch Defektelektronen. Der Strom fließt nur über eine Halbleiterstrecke (p-Leiter oder n-Leiter). Der Widerstand dieser Halbleiterstrecke wird durch ein elektrisches Feld gesteuert, welches den Leiterquerschnitt beeinflußt. Eine wichtige Gruppe der unipolaren Transistoren sind die *Feldeffekttransistoren*, kurz FET genannt.

Beim FET wird der Widerstand des Halbleiterkanals über ein elektrisches Feld von der Elektrode in der Mitte, *Gate* genannt, gesteuert. Die Elektroden an den Enden heißen *Source* (Quelle) und *Drain* (Senke). Beim n-Kanal-FET fließt ein Elektronenstrom von der Quelle zur Senke, beim p-Kanal-FET ein Defektelektronenstrom (Abb. 106.1). Bei der Herstellung dieser Transistoren geht man von p- oder n-leitendem Silizium aus. Dieses Grundmaterial wird als *Substrat* bezeichnet. Der Kanal weist beispielsweise bei p-Substrat n-leitenden Charakter auf. Die Umgebung der Anschlüsse für Source und Drain wird dabei stärker dotiert. Dies wird durch ein hochgestelltes + angezeigt (n^+, p^+).

Der Feldeffekttransistor ist ein veränderlicher Widerstand, bei dem der Strom der Ladungsträger durch ein elektrisches Feld gesteuert wird, welches quer zum Kanal angelegt wird. Je nach Steuerung dieses Widerstandes unterscheidet man verschiedene Typen von Feldtransistoren. In der weiteren Betrachtung wird der häufig verwendete MOS-FET (Metal-Oxide-Semiconductor-FET) herangezogen.

Der n-Kanal-MOS-FET besteht aus p-leitendem Substrat und einem n-Kanal mit stärker dotierten Bereichen für Drain und Source. Die Oberfläche des Kristalls ist mit einer isolierenden SiO_2-Schicht überzogen, die im Bereich von Drain und im Bereich von Source unterbrochen ist. Am Gate ist die Schicht stark verdünnt. Das Gate ist gegenüber dem Kanal isoliert und bildet mit dem Substrat eine kleine Kapazität. Der Anschluß des Substrats wird als Bulk (B) bezeichnet. Die Anschlußelektroden für S, G, D bestehen aus Aluminium.

Man unterscheidet je nach Ladungsträgerart des Grundmaterials zwischen dem *Anreicherungstyp* und dem *Verarmungstyp*.

Anreicherungstyp

Beim Anreicherungstyp ist aufgrund seines technischen Aufbaues ohne Gate-Spannung kein Kanal vorhanden. Das heißt: Zwischen S und D besteht im Inneren keine leitende Verbindung (Abb.106.3 oben). Unabhängig von der Polarität einer DS-Spannung sperrt einer der beiden pn-Übergänge. Kanal und Substrat sind durch eine Sperrzone getrennt. Man bezeichnet diesen Transistor deshalb auch als *selbstsperrenden* FET.

Wird eine Spannung zwischen Gate und Bulk angelegt, bildet sich ein elektrisches Feld aus. Dieses beeinflußt die Konzentration der Ladungsträger im Bereich zwischen Drain und Source. Durch eine positive Spannung am Gate werden Elektronen aus dem Substrat angezogen, welche zuerst mit den Defektelektronen rekombinieren. Bei weiterer Erhöhung der Gatespannung bildet sich im p-leitenden Trägermaterial unmittelbar gegenüber dem Gate eine sehr dünne Schicht mit Leitungselektronen aus. Der n-leitende Kanal verbindet die beiden n^+-Zonen leitend miteinander, sodaß ein Stromfluß bei angelegter DS-Spannung möglich ist (Abb. 106.3 unten).

Bei kleineren DS-Spannungen kann die Polung von D und S vertauscht werden, bei höheren DS-Spannungen ist dies nicht ohne Änderungen der Transistoreigenschaften möglich. Beim MOS-FET kann das Gate je nach Bedarf mit positiver oder negativer Spannung betrieben werden, was nicht für alle unipolaren Transistoren gilt.

Verarmungstyp

Der Verarmungstyp besitzt bereits einen eindiffundierten n-Kanal, der die beiden n^+-Zonen leitend miteinander verbindet. Dieser Transistor wird daher auch als *selbstleitender* FET bezeichnet (Abb. 107.1). Durch eine negative Ga-

te-Spannung verarmt der Kanal an Ladungsträgern. Bei weiterer Spannungserhöhung verschwindet er gänzlich.

Wegen der sehr geringen Dicke der Isolierschicht besteht die Gefahr eines elektrischen Durchschlags. Die Durchschlagspannung liegt bei 50 V - 100 V, ein Wert, der bereits durch Reibungselektrizität erreicht wird. Unipolare Transistoren werden daher mit kurzgeschlossenen Anschlüssen geliefert. Die Kurzschlußverbindung wird erst nach dem Einbau des Transistors gelöst.

Beim Bipolartransistor ist zur Steuerung ein bestimmter Basistrom erforderlich, der beim FET wegfällt. Die Steuerung erfolgt allein über ein elektrisches Feld, es fließt dabei kein Strom. Man spricht daher von leistungsloser Steuerung.

Transistorbezeichnungen

Die Bezeichnung eines Transistors setzt sich aus Buchstaben und Ziffern zusammen.

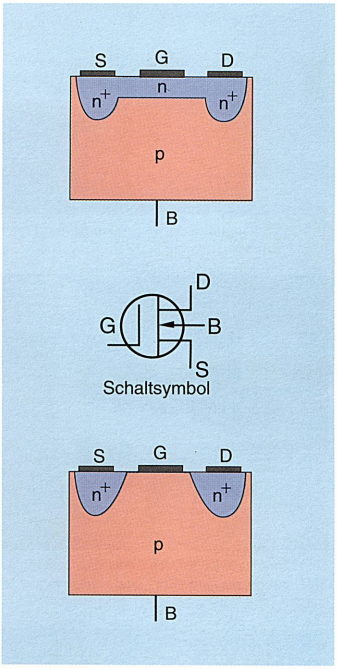
Der erste Buchstabe ist eine Materialangabe:

A ... Germanium
B ... Silizium

Der zweite Buchstabe bezeichnet das Anwendungsgebiet:

C ... Tonfrequenzbereich, kleine Leistung
D ... Tonfrequenzbereich, große Leistung
F ... Hochfrequenzbereich, kleine Leistung
L ... Hochfrequenzbereich, große Leistung
S ... Schalttransistor, kleine Leistung
U ... Schalttransistor, große Leistung

Ein dritter Buchstabe ist möglich; er gibt den sogenannten Industrietyp an. Die auf die Buchstaben folgenden Ziffern dienen zur laufenden Kennzeichnung.



107.1 Verarmungstyp ohne Steuerspannung (oben) und mit Steuerspannung (unten)

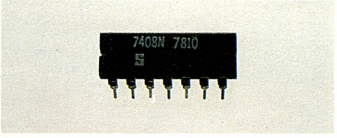
Integrierte Schaltungen

Die Halbleitertechnik hat das Gebiet der Elektronik von Grund auf verändert. Computer etwa enthalten tausende Halbleiterelemente wie Transistoren, Dioden usw. Diese können auf dünnen Halbleiterplättchen, den *Chips*, in *integrierten Schaltkreisen* untergebracht werden.
Die Packungsdichte wird immer größer, die *Miniaturisierung* ist ein großes Ziel. Infolge der Verkleinerung der Bauelemente sind die Signalverarbeitungszeiten stark verringert worden. Dadurch ergeben sich neue Lösungen in der Meß- und Steuerungstechnik, der Automatisierungstechnik und der Informationsverarbeitung.

Durch die großen Stückzahlen ist der Preis elektronischer Bausteine stark gesunken, daher werden sie in fast allen Bereichen eingesetzt, vom Herzschrittmacher bis zum Raumschiff.

Die Vereinigung mehrerer elektronischer Bauelelemente zu einer funktionsfähigen Schaltung auf einem Trägermaterial wird als *integrierte Schaltung* oder *IC (Integrated Circuit)* bezeichnet.

Dabei wird zwischen *Hybridtechnik* und *Monolithtechnik* unterschieden.

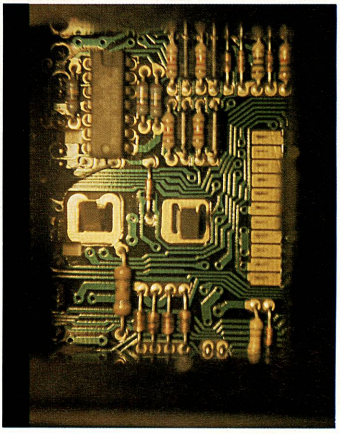


107.2 Eine integrierte Schaltung

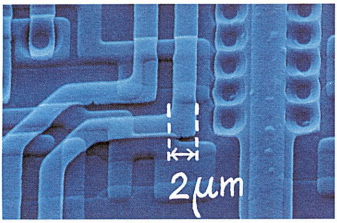
Hybridtechnik

Auf einen Grundkörper aus Oxidkeramikplatten werden durch Siebdrucktechnik oder Bedampfung im Vakuum Leiterbahnen, kleine Widerstände, Spulen und Kondensatoren aufgebracht. Diese werden auch als *passive Bauelemente* bezeichnet.

Die *aktiven Bauelemente*, wie Dioden und Transistoren, werden nachher eingelötet. Auch größere Widerstände und Spulen werden jetzt eingebaut. Durch eine Kunststoffschicht wird dann die Schaltung gegen äußere Einflüsse geschützt.

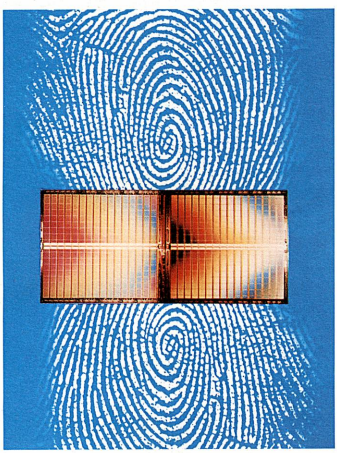


107.3 Blick in das Innere eines elektronischen Taschenrechners



108.1 Zweitausendfache Vergrößerung von Leiterbahnen eines Mikrocomputer-Peripherie-Bausteins

108.2 Im Quarz-Rohr-Ofen findet das Dotieren der Siliziumkristalle mit Bor- und Phosphoratomen statt.



108.3 Dieser Mikrochip kann 16 Millionen Informationseinheiten speichern. Die dafür benötigten 34 Millionen Bauelemente sind auf dem Raum einer menschlichen Fingerkuppe untergebracht. Die unvorstellbar feinen Strukturen dieses 16-Megabit-Chips sind erst im Elektronenmikroskop zu erkennen. Dann zeigen sich 240 000 Schalt- und Speicherkomponenten auf jedem Quadratmillimeter. Dieser in Europa entwickelte und nun auch produzierte Chip ist ein dynamischer Halbleiterspeicher, wie sie in allen elektronischen Rechnern für verschiedene Zwecke, vornehmlich aber als Arbeitsspeicher, Verwendung finden. Seine Leistung ist imponierend: Dieses Computer-Kurzzeitgedächtnis hat Platz für tausend vollgeschriebene Schreibmaschinseiten.

Monolithtechnik

Bei der Monolithtechnik wird die Schaltung auf einem einheitlichen Körper, meistens Silizium, erstellt. Dafür benötigt man jedoch hochreine Siliziumkristalle, welche durch das *Czochralskiverfahren* hergestellt werden.

Dabei wird in einem Schmelztiegel Silizium auf einer konstanten Temperatur von 1958 °C gehalten. Man taucht nun einen kleinen Impfkristall aus Silizium in die Schmelze, der unter ständigem Drehen langsam herausgezogen wird. Siliziumatome lagern sich am Kristall an, bis ein Durchmesser von 15 bis 20 cm erreicht ist. Die gewonnenen Kristalle werden in dünne Scheibchen geschnitten und poliert; diese werden als *Wafer* bezeichnet.

Zur Herstellung der Bauelemente wird das Siliziumplättchen in einer Sauerstoffatmosphäre auf 530 °C erhitzt, wodurch sich eine Siliziumdioxidschicht ausbildet. Danach wird das Plättchen mit einem lichtempfindlichen Lack überzogen. Anschließend wird der Lack durch eine Maske hindurch, welche die Struktur des Transistors oder der integrierten Schaltung aufweist, belichtet. Der Fotolack wird entwickelt und der belichtete Teil chemisch entfernt. Der unbelichtete Fotolack bleibt als Schutz gegen die anschließende Ätzung auf dem Oxid zurück. Das Oxid wird an den fotolack-freien Stellen weggeätzt, der restliche Fotolack mit Lösungsmitteln entfernt. Das verbleibende Oxid wirkt als Maske für die nachfolgende Diffusion. Dotieratome (z.B. Bor) diffundieren an den oxidfreien Stellen in den Kristall ein und erzeugen p-leitende Zonen. Bei Transistoren wird dier Fototechnik zwei- bis dreimal mit verschiedenen Masken wiederholt, bei integrierten Schaltungen bis zu zehnmal.

Danach wird das fertige Stück in Chips zerschnitten, von denen jeder bis zu einer Million Transistoren enthalten kann.

Durch Entwicklung neuer Technologien kann die Dichte der Bauelemente weiter vergrößert werden. Mit fortschreitender Verkleinerung der Bauteile treten quantenphysikalische Phänomene auf, die das Leitungsverhalten entscheidend beeinflussen.

Kontrollfragen

1. Was versteht man unter einem Energieband?
2. Wodurch unterscheiden sich die Energiebänder von elektrischen Leitern und Isolatoren?
3. Erläutere das Bändermodell des Halbleiters.
4. Was versteht man unter Eigenleitung?
5. Erkläre den Begriff Störstellenleitung.
6. Was sind Donatoren, was Akzeptoren?
7. Was ist eine Diode?
8. Erläutere den pn-Übergang.
9. Erkläre den Zenereffekt und den Avalancheeffekt.
10. Gib die Funktionweise a) der Zenerdiode, b) der Kapazitätsdiode, c) der Fotodiode, d) der Lumineszenzdiode, e) der Laserdiode an.
11. Wie erfolgt mit einer Diode die Gleichrichtung von Wechelstrom?
12. Wie ist ein Bipolartransistor aufgebaut?
13. Erkläre die Verstärkerwirkung eines Transistors.
14. Wann sperrt ein Transistor?
15. Was ist ein FET?
16. Wie funktioniert ein MOS-FET?
17. Wie werden Transistoren bezeichnet?
18. Welcher Unterschied besteht zwischen Hybrid- und Monolithtechnik?

7.5 Thermoelektrizität

Versuch

An die Enden eines Konstantandrahtes wird jeweils ein Kupferdraht gelötet. Diese Anordnung wird als *Thermoelement* bezeichnet. Die beiden Kupferenden werden mit einem Strommeßgerät verbunden. Weisen beide Lötstellen die gleiche Temperatur auf, wird kein Strom angezeigt. Erwärmt man nun eine Lötstelle, tritt ein Stromfluß auf, der mit steigender Temperaturdifferenz zunimmt (Abb. 108.1).

Erklärung: Aus Metallen können Elektronen austreten. Die erforderliche Austrittsarbeit ist jedoch materialabhängig. Sie ist bei Kupfer geringer als bei Konstantan. Es findet daher ein stärkerer Elektronenfluß vom Kupfer zum Konstantan statt als umgekehrt. Somit entsteht auf einer Seite ein Elektronenmangel, auf der anderen ein Elektronenüberschuß. Das bewirkt eine *Kontaktspannung* in der Berührungsschicht (Abb. 109.2). Sind beide Lötstellen auf gleicher Temperatur, fließt kein Strom, da sich gleich große Kontaktspannungen ausgebildet haben. Ein Stromfluß stünde im Widerspruch zum Energieerhaltungssatz. Das System würde stets innere Energie aufgrund der Erwärmung des Leiters (Ohmscher Widerstand) abgeben, welche von außen nicht ersetzt wird.

Der Elektronenübertritt von einem Metall ins andere ist temperaturabhängig. Wird eine Lötstelle erwärmt, steigt die thermische Bewegung der Elektronen; es entsteht eine größere Kontaktspannung als an der anderen. Ihre Differenz ergibt die *Thermospannung*. Sie bewirkt einen *Thermostrom*. Die Energie dafür liefert die Wärmequelle.

Der *thermoelektrische Effekt* wurde von *Th. J. Seebeck* im Jahr 1821 entdeckt.

> Beim thermoelektrischen Effekt wird innere Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt.

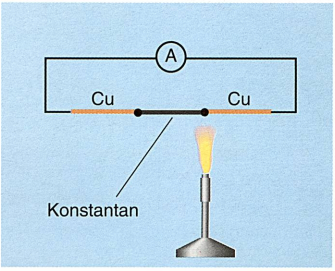
Metalle können in einer *thermoelektrischen Spannungsreihe* angeordnet werden: Antimon, Eisen, Zink, Kupfer, Silber, Zinn, Blei, Platin, Quecksilber, Nickel, Konstantan, Wismut.

Je weiter zwei Metalle in dieser Reihe voneinander entfernt sind, umso größer ist die Thermospannung, die entsteht. Jenes Element, welches weiter vorne steht, wird positiv geladen, das andere negativ.

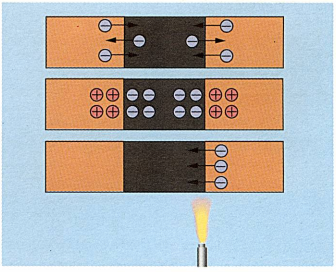
Ein einzelnes Thermoelement liefert eine sehr geringe Spannung (Mikrovoltbereich) pro °C Temperaturdifferenz. Um höhere Spannungen zu erreichen, muß man mehrere Thermoelemente hintereinanderschalten. Eine solche Anordnung wird als *Thermosäule* bezeichnet. Die aufeinanderfolgenden Lötstellen werden abwechselnd erwärmt und abgekühlt. Damit weisen zwei nebeneinanderliegende Lötstellen eine entspechend hohe Temperaturdifferenz auf. Die Umkehrung des thermoelektrischen Effektes heißt *Peltiereffekt*. Wird durch ein Thermoelement Strom geleitet, stellt man an einer Lötstelle eine Temperaturerhöhung, an der anderen eine Abkühlung fest.

Kontrollfragen

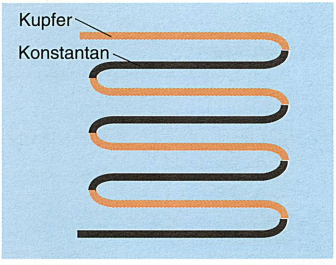
1. Was versteht man unter Thermoelektrizität?
2. Woraus besteht ein Thermoelement?
3. Warum werden verschiedene Metalle bei einem Thermoelement verwendet?
4. Was versteht man unter Kontaktspannung?
5. Warum fließt bei gleicher Temperatur der Lötstellen kein Thermostrom?
6. Was ist eine Thermosäule?
7. Wo wird der thermoelektrische Effekt angewendet?



109.1 Thermoelement: Erwärmt man eine Lötstelle, fließt ein Thermostrom.



109.2 Haben die beiden Lötstellen gleiche Temperatur, heben einander die Kontaktspannungen auf (oben). Bei einer Temperaturdifferenz ist dies nicht der Fall: Es fließt ein Thermostrom (unten).

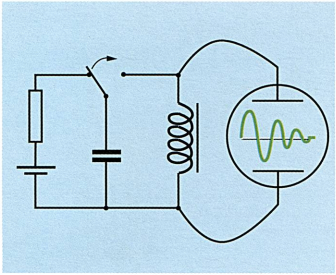


109.3 Schema einer Thermosäule

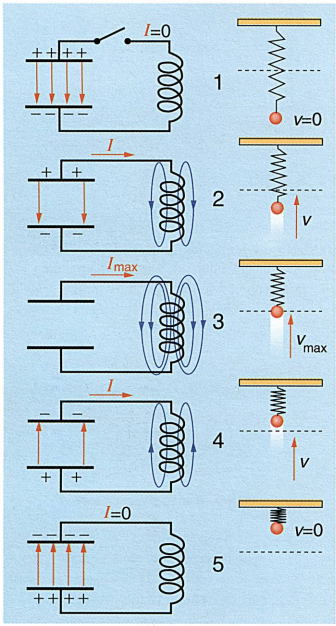
Anwendung des thermoelektrischen Effektes

Da die Thermospannung proportional zur Temperaturdifferenz der Lötstellen ist, werden Thermosäulen zur Temperaturmessung verwendet. Eine Lötstelle wird dabei auf konstanter Temperatur gehalten (z. B. 0 °C), die zu messende Temperatur wird über die auftretende Thermospannung bestimmt.

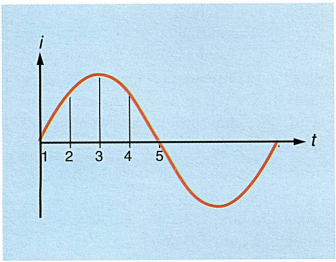
Auf diese Weise kann auch die Energieverteilung in Spektren gemessen werden, wenn die eine Lötstelle, auf welche die Strahlung auftrifft, geschwärzt wird. Das absorbierte Licht führt zur Erwärmung der Lötstelle.



110.1 Betätigt man nach dem Aufladen des Kondensators den Kippschalter, zeigt das Oszilloskop eine gedämpfte Schwingung.



110.2 Vergleich Schwingkreis und Federpendel: In beiden Fällen werden zwei Energieformen periodisch ineinander übergeführt.



110.3 Im Schwingkreis fließt ein sinusförmiger Wechselstrom.

8. Elektromagnetische Schwingungen und Wellen

8.1 Schwingkreis

Versuch

Ein Kondensator wird über einen Widerstand durch eine Gleichspannung aufgeladen und dann zu einer Spule parallelgeschaltet (Abb. 110.1). An einem angeschlossenen Oszilloskop ist eine rasch abklingende Schwingung – eine gedämpfte Schwingung – zu beobachten. Dieser LC-Parallelkreis verhält sich wie ein Federpendel, das nach einmaliger Auslenkung eine gedämpfte Schwingung vollführt.

Abb. 110.2 zeigt die Analogie zwischen dem *elektromagnetischen Schwingkreis* und einer mechanischen Schwingung:

(1) Das Federpendel wird ausgelenkt. Es besitzt potentielle Energie. — Der Kondensator wird aufgeladen. Er besitzt elektrische Feldenergie.

(2) Das Pendel wird losgelassen und beschleunigt in Richtung Nullage. Die potentielle Energie wird dabei in kinetische Energie umgewandelt. — Wird der geladene Kondensator zur Spule parallel geschaltet, entlädt er sich über die Spule. Der ansteigende Entladestrom erregt in der Spule ein Magnetfeld. Elektrische Feldenergie des Kondensators wird dabei in magnetische Feldenergie der Spule umgewandelt.

(3) Das Pendel hat die Nullage erreicht. Die potentielle Energie hat sich vollständig in kinetische Energie umgewandelt. — Der Kondensator ist entladen. Die gesamte elektrische Feldenergie ist in magnetische Feldenergie umgewandelt worden.

(4) Infolge ihrer Trägheit bewegt sich die Pendelmasse über die Ruhelage hinaus in Richtung zum oberen Umkehrpunkt. Dabei wird kinetische Energie wieder in potentielle Energie umgewandelt. — Infolge der Selbstinduktion (Trägheit) der Spule fließt der Strom weiter und lädt den Kondensator auf, allerdings mit umgekehrter Polarität. Das Magnetfeld der Spule wird abgebaut, und die elektrische Feldenergie des Kondensators nimmt zu.

(5) Der Pendelkörper hat den oberen Umkehrpunkt erreicht. Die kinetische Energie hat sich vollständig in potentielle Energie umgewandelt. — Die magnetische Feldenergie der Spule hat sich vollständig in elektrische Feldenergie des Kondensators umgewandelt.

Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis die Gesamtenergie des Systems aufgrund der Reibung beim Federpendel und der Ohmschen Verluste beim Schwingkreis in Wärme umgewandelt worden ist.

Wird ein Federpendel ausgelenkt und losgelassen, dann führt es Schwingungen durch. Dabei wird periodisch potentielle Energie in kinetische Energie und umgekehrt verwandelt.
Die Parallelschaltung von Kondensator und Spule wird als (elektromagnetischer) Schwingkreis bezeichnet. Wird der geladene Kondensator zur Spule parallelgeschaltet, dann fließt im Schwingkreis ein Wechselstrom. Man spricht auch von elektromagnetischen Schwingungen. Es wird dabei periodisch elektrische Energie des Kondensators in magnetische Energie der Spule umgewandelt.

Sieht man von der Dämpfung ab, dann ist der im Schwingkreis fließende Wechselstrom sinusförmig. Abb. 110.3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Stromstärke während einer Periode.

Beim ungedämpften Schwingkreis wird die elektrische Feldenergie vollständig in magnetische Feldenergie und umgekehrt umgewandelt:

(1) $\frac{L I^2}{2} = \frac{C U^2}{2}$

Die Spannung U des geladenen Kondensators verursacht die Stromstärke I in der Spule (vgl. Seite 69):

(2) $I = \frac{U}{\omega L}$

(1), (2) $\frac{L U^2}{2 \omega^2 L^2} = \frac{C U^2}{2} \Leftrightarrow \omega^2 = \frac{1}{L C} \Leftrightarrow \cdots \Leftrightarrow f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}}$

Thomsonsche Frequenzformel

$$f = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}}$$

Die Thomsonsche Formel gibt die Frequenz des Wechselstromes im Schwingkreis – also die Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen – an. Diese Frequenz entspricht der Resonanzfrequenz für die Parallelschaltung von Kondensator und Spule (vgl. Seite 73).

Die Frequenz, mit der ein Schwingkreis nach einmaliger Energiezufuhr schwingt, heißt Eigenfrequenz oder Resonanzfrequenz.

8.2 Erzeugung ungedämpfter Schwingungen

Rückkopplung

Um eine ungedämpfte Schwingung zu erhalten, muß dem Schwingkreis die Energie, die im Ohmschen Widerstand als Wärme verloren gegangen ist, im richtigen Augenblick zugeführt werden.

Bei einer Pendeluhr stellt die aufgezogene Feder – oder das gehobene Gewicht – ein Energiereservoir dar. Die Schwingungsfrequenz wird durch das Pendel bestimmt (Abb. 111.1). Über Anker und Steigrad steuert das Pendel selbst die Energiezufuhr im richtigen Augenblick (Selbststeuerung). Die Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen erfolgt nach demselben Prinzip.

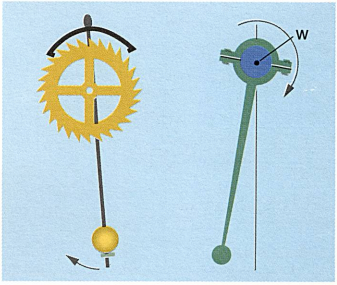
Eine derartige Schaltung zur Erzeugung elektromagnetischer Schwingungen – ein Oszillator – wurde im Jahr 1913 von *A. Meißner* gebaut (Abb. 111.2). Die Rückkopplung erfolgt nach dem Transformatorprinzip (induktiv). Ist der Schwingkreis einmal zu Schwingungen angeregt, dann wird in der Rückkopplungsspule eine Spannung induziert, die an den Eingang der Schaltung zurückgeführt wird. Nach einer Verstärkung wird sie wieder dem Schwingkreis zugeleitet. Dadurch vergrößert sich die Ausgangsspannung und mit ihr die rückgekoppelte Spannung. Auf diese Weise steigt die Ausgangsspannung des Oszillators bis zu einem durch den Verstärker bedingten Wert an.

Die erste Anregung des Schwingkreises zu Schwingungen erfolgt durch Stromstöße, die beim Einschalten des Verstärkers stets auftreten. Der Oszillator "schaukelt" sich selbst hoch. Der Verstärker ist, vereinfacht gesehen, ein elektronischer Schalter. Die an seinen Eingang zurückgeführte Spannung steuert die Energiezufuhr an den Schwingkreis. Energiereservoir ist die Stromversorgung des Verstärkers. Die Schwingungsfrequenz des Oszillators ist durch Kapazität und Induktivität des Schwingkreises bestimmt. Der Verstärker kann mit einer Elektronenröhre oder mit einem Transistor gebaut werden.

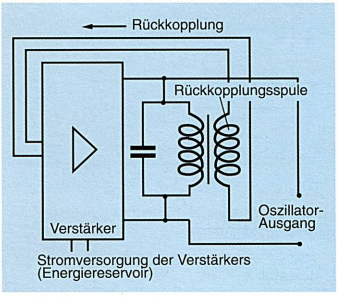
Abb. 111.3 zeigt die Prinzipschaltung eines Meißner-Oszillators mit einem Transistor.

Versuch

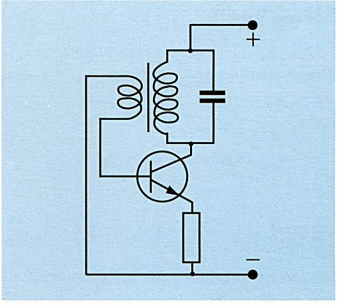
Wird die Schwingkreisspannung an ein Oszilloskop gelegt, kann die Schwingung beobachtet werden. Schaltet man einen Lautsprecher in den Schwingkreis, können die Schwingungen auch hörbar gemacht werden (Abb. 111.4). In diesem Fall dient die Energiezufuhr (Verstärkung) nicht nur zur Abdeckung



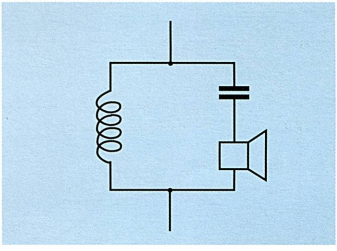
111.1 Rückkopplung bei der Pendeluhr: Das Pendel steuert über Anker und Steigrad die Energiezufuhr im Takt seiner Eigenfrequenz (links). Rückkopplung beim Reibungspendel (rechts).



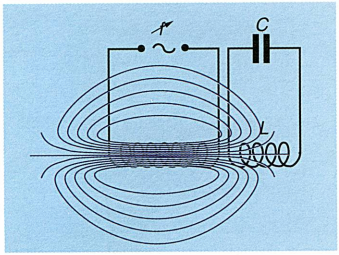
111.2 Rückkopplungsschaltung nach A. Meißner



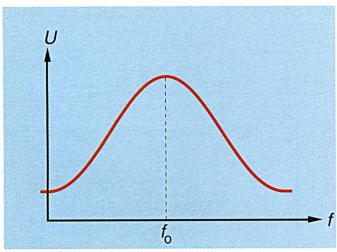
111.3 Der Verstärker ist mit einem Transistor gebaut.



111.4 So werden die Schwingungen hörbar gemacht.



112.1 Frequenzgenerator und Schwingkreis sind induktiv gekoppelt. Der Schwingkreis schwingt mit der Erregerfrequenz f.



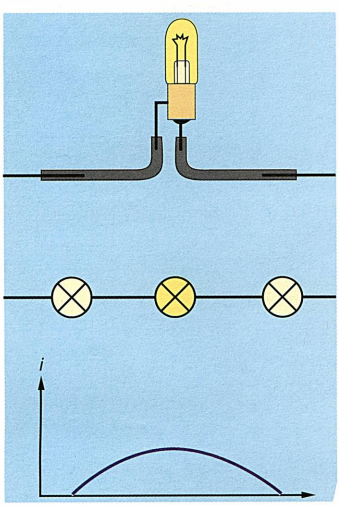
112.2 Die Schwingkreisspannung erreicht im Resonanzfall ein Maximum.

Beispiel A

$L = 10\ \mu\text{H},\ C = 100\ \text{pF}$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{10^{-5}\ \text{H} \cdot 10^{-10}\ \text{F}}} \approx 5\ \text{MHz}$$

Diese Frequenz liegt im Hochfrequenzbereich (HF).



112.3 In einem Empfangsdipol fließt Strom, obgleich es keinen geschlossenen Leiterkreis gibt.

der Ohmschen Verluste, sondern sie ersetzt auch die an den Lautsprecher abgegebene Energie.

Erzwungene Schwingungen

Ein elektromagnetischer Schwingkreis läßt sich ebenso wie etwa ein Federpendel zu erzwungenen Schwingungen anregen. Dabei kann ebenfalls Resonanz auftreten.

Versuch

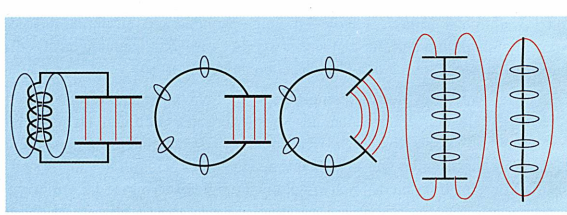
Eine Spule (Erregerspule) wird an einen Frequenzgenerator angeschlossen (Abb. 112.1). In ihre Nähe wird die Spule eines Parallelschwingkreises gebracht. Durch diese induktive Kopplung wird im Schwingkreis eine Wechselspannung mit der Erregerfrequenz f induziert. Der Schwingkreis schwingt gezwungenermaßen mit der Erregerfrequenz f. Die Schwingkreisspannung wird am Oszilloskop beobachtet. Sie erreicht im Resonanzfall ein Maximum, wenn also die Erregerfrequenz f gleich der Eigenfrequenz f_0 des Schwingkreises ist (Abb. 112.2).

Das Bild zeigt die Abhängigkeit der Schwingkreisspannung von der Frequenz (Resonanzkurve).

8.3 Hochfrequente Schwingungen (Dipolschwingungen)

Nach der Thomsonschen Formel ist die Eigenfrequenz eines Schwingkreises umso höher, je kleiner Induktivität und Kapazität sind — siehe Beispiel A in der Randspalte!

Eine kleine Induktivität erfordert nur wenige Windungen der Spule, eine kleine Kapazität ist schon bei geringen Plattenflächen vorhanden. Eine Verringerung der Windungszahl der Spule führt schließlich zu einem Schwingkreis mit einer einzigen Windung. Die Platten des Kondensators sind durch eine Leiterschleife miteinander verbunden. Zieht man die Platten des Kondensators auseinander, verringert sich seine Kapazität. Man erhält einen "offenen" Schwingkreis mit einer hohen Eigenfrequenz. Während bei einem "geschlossenen" Schwingkreis die Feldlinien im wesentlichen nur innerhalb der Spule und des Kondensators verlaufen, treten sie beim "offenen" Schwingkreis aus den Bauelementen heraus. Schließlich wird die Leiterschleife geradegebogen, und die Kondensatorplatten werden weggelassen. Auch ein gerades Leiterstück besitzt eine Induktivität und eine Kapazität, wenn sie auch sehr klein sind. Das Leiterstück stellt einen Schwingkreis für sehr hohe Frequenzen dar und wird als *Dipol* (*Hertzscher Dipol*) bezeichnet. Dieser Dipol ist die Grundform der *Antenne*.



112.4 Vom geschlossenen Schwingkreis zum Hertzschen Dipol

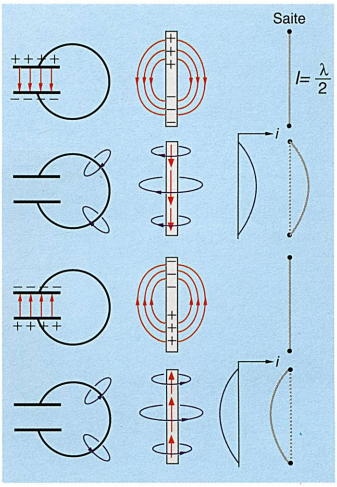
Versuch

Der Dipolstab ist in der Mitte unterbrochen worden, um ein Lämpchen einzubauen. Verschiebbare Metallhülsen erlauben es, die Länge zu verändern. Wird dieser Empfangsdipol in die Nähe eines Hochfrequenzoszillators gebracht, dann leuchtet das Lämpchen, wenn eine bestimmte Stablänge eingestellt wird. Werden in den beiden Dipolhälften weitere Lämpchen angebracht, so leuchten diese schwächer als das mittlere Lämpchen. Die Stromstärke nimmt zu den Dipolenden hin ab. Dieses Ergebnis ist erstaunlich, denn es zeigt, daß im Dipolstab Strom fließt, obwohl kein geschlossener Stromkreis vorliegt (Abb. 112.3).

Abb. 113.1 zeigt Ladungs- und Stromverteilung in einem geschlossenen Schwingkreis und in einem Dipol. Bei der Untersuchung des Schwingkreises wurde ein geladener Kondensator zu einer Spule parallel geschaltet. Bei einem Dipol ist diese Trennung zwischen Kondensator und Spule nicht vorhanden. Dem geladenen Kondensator entspricht eine Anhäufung von negativen Ladungen (Elektronenüberschuß) und positiven Ladungen (Elektronenmangel) an den Stabenden. Der Kondensator im Schwingkreis entlädt sich über die Spule. Der Stromfluß baut ein Magnetfeld auf. Ist der Kondensator entladen, fließt der Strom aufgrund der Trägheit weiter. Infolge der Ladungsunterschiede zwischen den Stabenden fließt ein Strom, der ein Magnetfeld aufbaut. Haben sich die Ladungsunterschiede ausgeglichen, dann fließt der Strom infolge der Trägheit des Magnetfeldes weiter. Die Ladungsverteilung kehrt sich um.

In einem Dipolstab finden Ladungsschwingungen statt. Man spricht auch von Dipolschwingungen. Es fließt dabei ein hochfrequenter Wechselstrom. Der Dipolstab besitzt eine Eigenfrequenz, die von der Stablänge abhängig ist.

Wird ein Dipolstab in die Nähe des Schwingkreises eines Hochfrequenzoszillators gebracht, dann wird er zum Schwingen angeregt. Die Schwingungen sind am stärksten, wenn die Oszillatorfrequenz mit der Dipoleigenfreqenz übereinstimmt (Resonanz). Die Stromverteilung im Dipol erinnert sehr an die Grundschwingungen einer Saite. Die Schwingungen einer Saite lassen sich als stehende Wellen auffassen. Ebenso kann man sich die Schwingungen eines elektrischen Dipols als stehende elektrische Wellen vorstellen. Für die Grundschwingung gilt: $l = \lambda/2$. Ein Dipol mit dieser Länge wird auch als $\lambda/2$-Dipol bezeichnet.

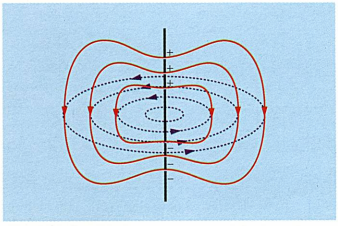


113.1 Ladungs- und Stromverteilung in einem Schwingkreis und in einem Dipol

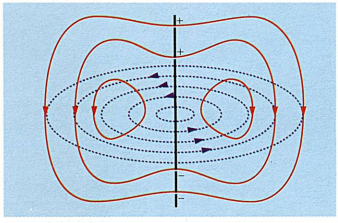
8.4 Entstehung und Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Koppelt man einen Dipol mit einem Oszillator, wird er zum Schwingen angeregt. Er ist ein *Sendedipol*.

Während der ersten Viertelperiode der Dipolschwingung gibt es eine Ladungsanhäufung an den Dipolenden. Zwischen den Ladungen entgegengesetzter Polarität bilden sich elektrische Feldlinien (Abb. 113.2).


113.2 Elektrische und magnetische Feldlinien zur Zeit $t = T/4$

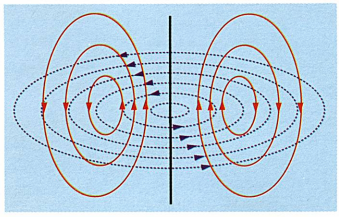
Während der zweiten Viertelperiode haben sich die Feldlinien vom Dipol weiter entfernt. Da sich aber gleichzeitig die Ladungsanhäufungen verringert haben, enden nicht mehr alle Feldlinien im Dipol. Die innere Feldlinie ist vom Dipol "abgeschnürt", also in den Raum "hinausgestrahlt". Dieses "Abschnüren" der Feldlinien und "Abstrahlen" ist umso stärker, je höher die Schwingungsfrequenz des Dipols ist (Abb. 113.3 und 113.4).


113.3 Elektrische und magnetische Feldlinien zur Zeit $T/4 < t < T/2$

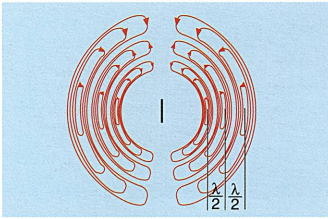
Nach der dritten Viertelperiode hat sich die Ladungsverteilung umgekehrt. Es treten elektrische Feldlinien mit entgegengesetztem Richtungssinn auf. Die während der ersten Viertelperiode entstandenen Feldlinien haben sich – inzwischen vollständig abgeschnürt – schon weiter ausgebreitet.

Nach einer vollen Schwingungsperiode des Dipols hat sich diese zweite Gruppe von elektrischen Feldlinien vom Dipol entfernt. Insgesamt hat sich nach einer vollen Periode ein vollständiger Wellenzug mit der Wellenlänge λ vom Dipol gelöst und im Raum fortgepflanzt (Abb. 114.1).

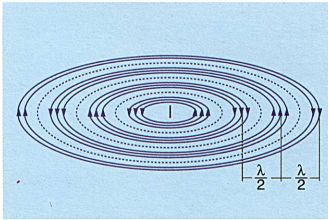
Fließt Strom im Dipol, dann entsteht auch ein Magnetfeld. Die magnetischen Feldlinien umgeben den Dipol ringförmig. Diese magnetischen Feldlinien entfernen sich mit den elektrischen Feldlinien vom Dipol. Kehrt sich die Stromrichtung um, dann dreht sich auch die Richtung der magnetischen Feldlinien um (Abb. 114.2).


113.4 Elektrische und magnetische Feldlinien zur Zeit $t = T/2$

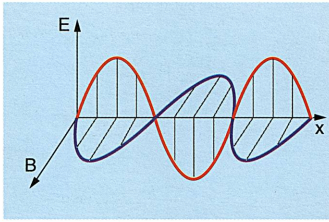
Von einem schwingenden Dipol entfernen sich elektrische und magnetische Felder. Man spricht von einer *elektromagnetischen Welle*.



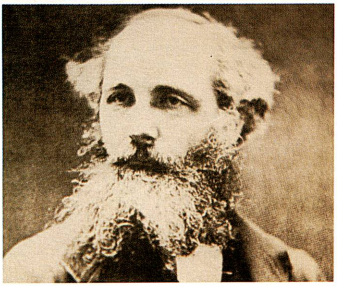
114.1 Elektrische Feldlinien eines Dipols



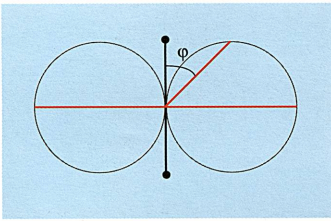
114.2 Magnetische Feldlinien eines Dipols



114.3 Eine elektromagnetische Welle läßt sich mit einer mechanischen Transversalwelle vergleichen.



114.4 *James Clerk Maxwell* (1831 – 1879)



114.5 Die abgestrahlte Energie ist quer zur Dipolachse maximal. (Sie ist proportional zu $\sin^2 \vartheta$.)

Die Wirkung eines elektrischen Feldes wird durch die elektrische Feldstärke $\boldsymbol{E}$, die eines magnetischen Feldes durch die Flußdichte $\boldsymbol{B}$ beschrieben. $\boldsymbol{E}$ und $\boldsymbol{B}$ sind vektorielle Größen, man nennt sie daher auch Feldvektoren. Die beiden Feldvektoren stehen stets senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht aufeinander. Eine elektromagnetische Welle läßt sich mit einer mechanischen Transversalwelle vergleichen. Bei dieser schwingen die Teilchen eines Mediums quer zur Ausbreitungsrichtung. Bei einer elektromagnetischen Welle schwingen elektrische und magnetische Felder quer zur Ausbreitungsrichtung.

Elektromagnetische Wellen sind Transversalwellen. Elektrisches und magnetisches Feld sind in Phase.

Wird etwa ein Teilchen eines festen Körpers zu Schwingungen angeregt, so pflanzen sich diese Schwingungen und damit auch Energie von Teilchen zu Teilchen fort. Diese mechanische Welle beruht darauf, daß die einzelnen Teilchen des festen Körpers elastisch aneinander gekoppelt sind.

Elektromagnetische Wellen breiten sich auch im Vakuum aus. Welche Art von Kopplung ermöglicht die Übertragung von Schwingungen und Energie? *James Clerk Maxwell* hat bereits im Jahr 1865 die *Theorie der elektromagnetischen Wellen* aufgestellt, obwohl diese noch nicht experimentell nachgewiesen waren.

Jedes sich ändernde elektrische Feld ist von einem magnetischen Wechselfeld umschlossen. Jedes sich ändernde magnetische Feld ist von einem elektrischen Wechselfeld umschlossen. Veränderliche elektrische und magnetische Wechselfelder sind miteinander gekoppelt.

Elektrische und magnetische Wechselfelder erzeugen sich gegenseitig und halten sich damit aufrecht. Erst im Jahr 1888 konnte *Heinrich Hertz* elektromagnetische Wellen experimentell nachweisen.

Elektromagnetische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Im Vakuum und praktisch auch in Luft beträgt die Lichtgeschwindigkeit $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s.

Es gilt auch der für mechanische Wellen gültige Zusammenhang $c = \lambda f$. f ist die Schwingungsfrequenz des Dipols und damit auch die Frequenz der sich ausbreitenden elektrischen und magnetischen Wechselfelder.

Elektrische und magnetische Felder besitzen einen Energieinhalt. Daher wird auch durch elektromagnetische Wellen Energie transportiert. Trifft eine elektromagnetische Welle auf einen Dipol (Leiter), dann werden in ihm Ladungsverschiebungen hervorgerufen. Verursacht wird dies ausschließlich durch das elektrische Feld, da das magnetische Feld ja nur auf bewegliche Ladungen wirkt. Im Dipol fließt ein Wechselstrom mit der Frequenz des Senders. Untersucht man mit einem Empfangsdipol das Strahlungsfeld eines Sendedipols, so findet man, daß die abgestrahlte Energie nicht in alle Richtungen gleich ist (Abb. 114.5). Ein Dipol strahlt bevorzugt quer zur Dipolachse.

Dipolschwingungen sind Ladungsschwingungen. Das bedeutet aber, daß ständig Ladungen (Elektronen) beschleunigt und verzögert werden. Daher hat Maxwell die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen auf die Beschleunigung von Ladungen zurückgeführt.

Eine beschleunigte elektrische Ladung strahlt elektromagnetische Wellen ab.

Aus der Maxwellschen Theorie folgt, daß die abgestrahlte Leistung proportional zum Quadrat der Beschleunigung ist: $P \sim a^2$.

In der *Röntgenröhre* werden Elektronen zwischen Anode und Katode auf sehr hohe Geschwindigkeiten beschleunigt. Beim Aufprallen auf die Anode wer-

den sie wieder stark abgebremst. Dabei entsteht die sogenannte *Bremsstrahlung*. Im Zyklotron und auch in anderen Teilchenbeschleunigern bewegen sich Ladungen auf Kreisbahnen. Jede Kreisbewegung ist aber eine beschleunigte Bewegung, daher wird Strahlung ("Synchrotronstrahlung") abgegeben.

Ein großes physikalisches Problem entstand zu Beginn des 20. Jahrhunderts, als man die Maxwellsche Theorie auf die in den Atomen kreisenden Elektronen anwendete. Ein um den Atomkern kreisendes Elektron müßte danach ständig Energie abstrahlen und daher in den Kern stürzen. Erst mit Hilfe der Quantenphysik konnte dieses Problem gelöst werden.

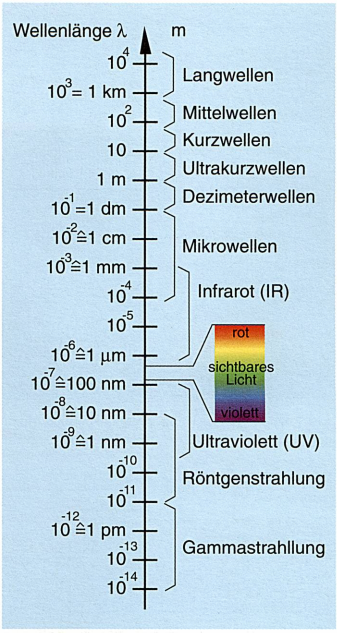
Auch im elektrischen Funken und im Blitz werden Ladungen beschleunigt und damit elektromagnetische Ladungen abgestrahlt.

Versuch

Ein Rundfunkempfänger wird im UKW-Bereich so eingestellt, daß kein Sender empfangen wird. Daneben wird eine Klingel ohne Glocke in Betrieb genommen. Im Radio sind Störgeräusche hörbar. Der Funke beim Unterbrecherkontakt der Klingel sendet elektromagnetische Wellen in einem größeren Frequenzbereich aus.

Das elektromagnetische Spektrum

Bereits Maxwell hat theoretisch begründet, daß das sichtbare Licht eine elektromagnetische Welle ist. Mit Hilfe der Maxwellschen Theorie lassen sich Radiowellen und Licht gleichermaßen behandeln. Das elektromagnetische Spektrum (Abb. 115.1) reicht von niederfrequenten Radiowellen bis zur höchstfrequenten Gammastrahlung aus dem Atomkern. Die einzelnen Bereiche des elektromagnetischen Spektrums unterscheiden sich durch die Frequenz (Wellenlänge). Auch bezüglich Erzeugung, Ausbreitung und Wechselwirkung mit Materie bestehen große Unterschiede zwischen den einzelnen Frequenzbereichen.



115.1 Das elektromagnetische Spektrum

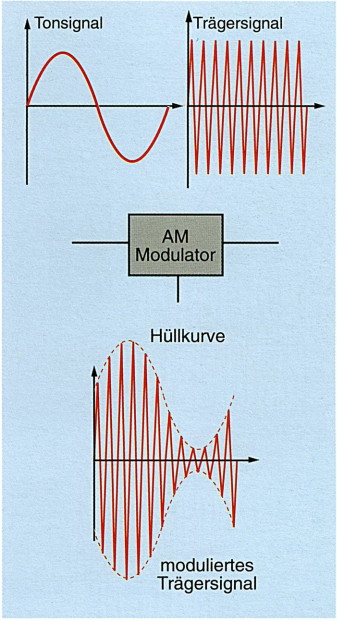
8.5 Nachrichtenübertragung durch Radiowellen

Im Jahr 1897 übertrug *Guglielmo Marconi* in England zum ersten Mal über eine Strecke von 5 km drahtlos Informationen. In den Anfängen der drahtlosen Informationsübertragung verwendete man Funkenstrecken als Sender. Daher kommen auch die Bezeichnungen "funken", Hörfunk", "Rundfunk". Die Elektronenröhre wurde erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts erfunden. Die Nachrichtenübertragung durch elektromagnetische Wellen soll am Beispiel des Hörfunks erläutert werden.

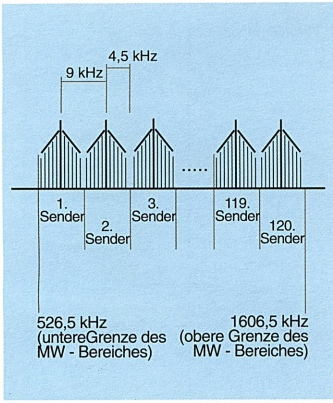
Der Hörfunk überträgt Sprache und Musik. Diese akustischen Signale werden durch einen elektroakustischen Wandler (Mikrofon) in elektrische Signale umgewandelt. Aus Luftdruckschwankungen entstehen elektrische Wechselspannungen. Diese liegen im Tonfrequenzbereich (20 Hz – 20 kHz). Sie werden auch kurz als *Tonfrequenz* oder *Niederfrequenz* (NF) bezeichnet. Diese Tonfrequenzsignale werden mit Hilfe einer hochfrequenten elektromagnetischen Welle, der *Trägerwelle*, übertragen. Zu diesem Zweck wird das Trägersignal im Sender durch das Tonfrequenzsignal beeinflußt. Diese Beeinflussung nennt man *Modulation*. Bei der *Amplitudenmodulation* (AM) wird die Amplitude des Trägersignals durch das Tonfrequenzsignal beeinflußt (Abb. 115.2).

Die Amplitude des Trägersignals schwankt im Rhythmus der Tonfrequenz. Im Empfänger muß das Tonfrequenzsignal aus dem modulierten Trägersignal gewonnen werden. Diese Rückgewinnung der Tonfrequenz nennt man *Demodulation*.

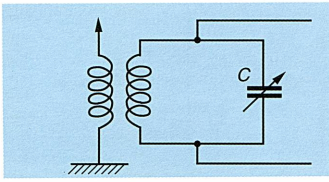
Nun wird aber nicht nur eine einzige Tonfrequenz übertragen, sondern es treten alle möglichen Frequenzen im Hörbereich des Menschen auf. Für die Rundfunkübertragung mit AM ist die größte zu übertragende Tonfrequenz mit 4500 Hz festgelegt. Das bedeutet, daß neben der Trägerfrequenz noch ein ganzes Frequenzband – die *Seitenfrequenzen* – übertragen werden müssen.



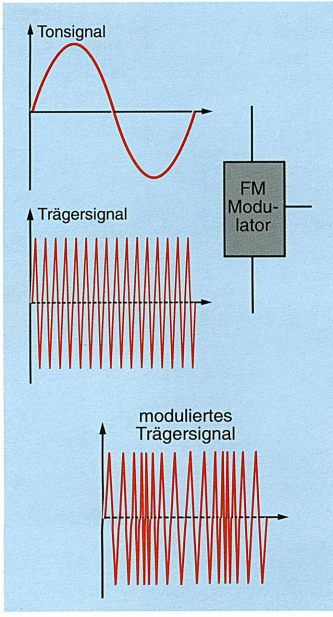
115.2 Amplitudenmodulation der Trägerwelle. Die Amplitude schwankt im Rhythmus der Tonfrequenz.



116.1 Jedem Sender ist ein Frequenzbereich mit einer Bandbreite von 9 kHz zugewiesen.



116.2 Abstimmen des Empfängerschwingkreises: Seine Eigenfrequenz wird auf die Trägerfrequenz des gewünschten Senders eingestellt.



116.3 Frequenzmodulation des Trägersignals

Die zu übertragende Bandbreite beträgt 9 kHz, das ist der doppelte Wert der höchsten Tonfrequenz. Die Frequenzbereiche für den Rundfunk sind durch internationale Absprachen festgelegt. Für LW, MW und KW wird die Amplitudenmodulation verwendet. Damit keine gegenseitigen Störungen durch verschiedene Sender auftreten, dürfen sich die Seitenbänder der in den Frequenzen benachbarten Sender nicht überlappen (Abb. 116.1). Dadurch ist die Zahl der Sender je Wellenbereich begrenzt.

Durch die Antenne des Empfängers werden die Signale von einer großen Anzahl von Sendern aufgenommen. Da ja nur ein Sender empfangen werden soll, muß auf die Frequenz (Trägerfrequenz) des gewünschten Senders eingestellt werden. Dieses Einstellen nennt man *Abstimmen*. Das Abstimmen erfolgt mit einem Parallelschwingkreis (Abb. 116.2). Dabei wird die Kapazität des Kondensators so lange verändert, bis die Resonanzfrequenz des Schwingkreises gleich der Trägerfrequenz des Senders ist. Der Schwingkreis ist frequenzselektiv. Im Resonanzfall tritt am Schwingkreis ein Spannungsmaximum der gewünschten Trägerfrequenz auf. Diese Trägerfrequenz (Hochfrequenz) wird sodann verstärkt und schließlich demoduliert.

Im UKW-Bereich wird das Trägersignal *frequenzmoduliert*. Bei der Frequenzmodulation (FM) wird die Trägerfrequenz im Rhythmus der Tonfrequenz verändert (Abb. 116.3). Eine kleine Tonfrequenzspannung bewirkt eine kleine Abweichung von der Trägerfrequenz (Frequenzhub). Die Tonfrequenz selbst bestimmt die Geschwindigkeit der Trägerfrequenzänderung. Die Bandbreite beträgt bis zu 300 kHz, also wesentlich mehr als bei der AM. Dafür ist die FM wesentlich störunempfimdlicher als die AM.

Aufgaben

122. Ö3 sendet unter anderem auf 89,2 MHz. Wie groß ist die Wellenlänge?

123. In einem Empfänger erfolgt die Abstimmung im MW-Bereich (526,5 kHz – 1606,5 kHz) durch einen Parallelschwingkreis mit einer Spule (L = 0,18 mH) und einem Drehkondensator mit der maximalen Kapazität von 500 pF. In welchem Bereich muß die Kapazität veränderbar sein?

Kontrollfragen

1. Erkläre die Entstehung einer gedämpften elektromagnetischen Schwingung. Vergleiche mit dem Federpendel.
2. Was versteht man unter der Resonanzfrequenz eines Schwingkreises?
3. Erkläre das Prinzip der Schwingungserzeugung durch Rückkopplung.
4. Erkläre die Funktion eines Transistor-Oszillators.
5. Welches Verhalten zeigt ein fremderregter Schwingkreis?
6. Welcher Unterschied besteht zwischen einem geschlossenen und einem offenen Schwingkreis?
7. Erkläre die Schwingungen eines Dipols.
8. Beschreibe die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen.
9. Welche grundlegenden Eigenschaften haben elektromagnetische Wellen?
10. Welcher Kopplungsmechanismus ist für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen verantwortlich?
11. Was bewirken a) ruhende, b) gleichförmig bewegte, c) beschleunigte elektrische Ladungen?
12. Nenne Beispiele für die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen durch beschleunigte Ladungen.
13. Was versteht man unter Modulation, was unter Demodulation?
14. Erkläre die Amplitudenmodulation.
15. Welche Rolle spielt die Bandbreite?
16. Was versteht man unter Abstimmen eines Empfängers? Wie erfolgt es?

Lösungen

1 $1{,}83 \cdot 10^{-7}$ As
0,12 N

2 Die Gesamtkraft ist Null.

3 $F_G = 3.6 \cdot 10^{-47}$N ; $F_C = 8{,}2 \cdot 10^{-8}$N
$F_G : F_C = 1 : 2{,}28 \cdot 10^{39}$

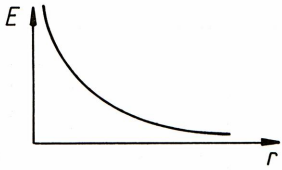
4 $1{,}37 \cdot 10^{-8}$As

5 41,68 N

6 $1{,}68 \cdot 10^{7}$ m/s

7 $1{,}08 \cdot 10^{7}$ N/As

8



9 $4{,}4 \cdot 10^{-7}$As

10 $1{,}13 \cdot 10^{10}$m^2

11 709 µF

12 $2{,}66 \cdot 10^{-2}$N

13 Die Kapazität verdoppelt sich, die Ladung bleibt gleich, Spannung und Feldstärke werden halbiert.

14 88,5 pF

15 45,5 pF; $2{,}75 \cdot 10^{-7}$J

16 28 µF

17 60 J

18 3,21 pF

19 4 pF, 1 pF

20 26,67 pF; $5{,}81 \cdot 10^{-6}$J

21 10,42 V

22 263,16 V

23 105,01 N

24 85 Ω

25 276,41 °C

26 98,95 °C

27 22 Ω

28 273,6 kWh

29 40,33 Ω

30 88,86 Ω

31 a) 0,3 Ω; b) 20 A

32 2,03 Ω

33 5,73 Ω

34 17,4 V, 32,6 V

35 10 Teile

36 18 kΩ

37 1,32 Ω

38 0,64 A

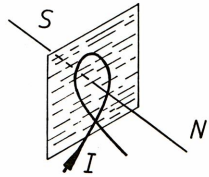
39 4,439 A; 1,837 A; 2,602 A

40 133,33 Ω

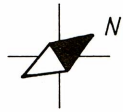
41 90,5 V

42 5,33 V; 4,49 V

43



44



45 Zum unteren Rand des eisernen Heizkörpers weist der Südpol der Magnetnadel. Zum oberen Rand zeigt der Nordpol. Der Heizkörper ist durch das Magnetfeld der Erde magnetisiert.

46 Gleiche Flußdichten. $\Phi_a > \Phi_b$

47 $5 \cdot 10^{-3}$ Vs

48 Nach unten

49 a) $2{,}52 \cdot 10^{-2}$ N b) 0

50 Die Kräfte, die an den beiden seitlichen Zuleitungen angreifen, heben einander auf.

51 a) 1,7 · 10-5 Nm b) 0

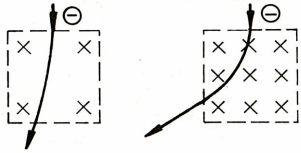
52 Geradlinig, entlang der Spulenachse

53 Eine Vergrößerung (Verkleinerung) von U bewirkt eine Vergrößerung (Verkleinerung von r.

54 Elektronen und Protonen werden in entgegengesetzter Richtung abgelenkt. Elektronen werden stärker abgelenkt.

55 Keine Energieänderung (v = const.)

56



57 1,6 mT

58 a) 1,3 · 10-7 s b) 7,6 MHz
c) Der Bahnradius ist unabhängig von der Umlaufzeit.

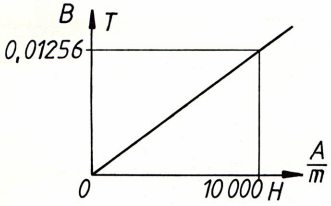
59 0,1 c

60 4 cm

61 1553 Amperewindungen

62 6 mT

63



64 6 mT

65 200 A/m

66 In der Luftspule verdoppelt sich die Flußdichre (linearer Zusammenhang: $B = \mu_o H$)

67 $[B] \cdot [H] = \frac{Vs}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{VAs}{m^3} = \dots = \frac{\text{Energie}}{\text{Volumen}}$

68 0,3 J/dm^3 15 W

69 220 Windungen

70 a) Im Kern mit dem kleineren Durchmesser
b) $B_1 : B_2 = D_2 : D_1$

71 1325 Amperewindungen

72 a) $R_{mE} = 3{,}2 \cdot 10^5$ A/Vs; $R_{mL} = 2 \cdot 10^7$ A/Vs
b) 3185 Amperewindungen

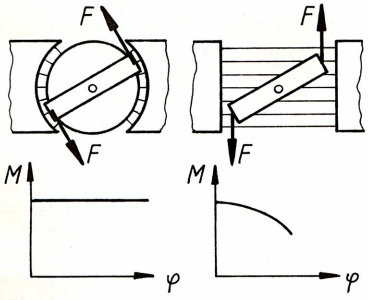
73 6,5 mT

74 Die Tragkraft verringert sich mit der Vergrößerung des Luftspaltes, da die Flußdichte abnimmt.

75 Aus $F \sim B^2$ folgt wegen $B \sim I$: $F \sim I^2$

76 Alle Stromkreise bleiben geschlossen. Die Lampe leuchtet.

77

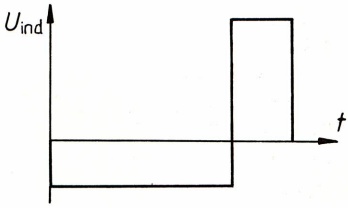


konstantes Drehmoment lineare Skala

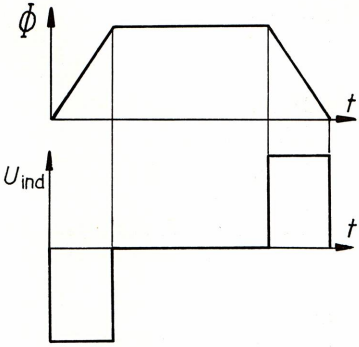
Drehmoment nicht konstant

78 20°

79



80



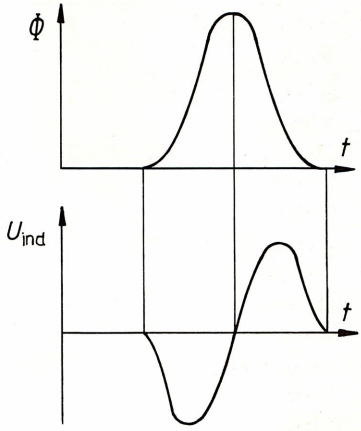
81 Beim Hineinbewegen nimmt der Fluß zu, beim Herausziehen nimmt er ab.

82 Die Spannungsstöße sind gleich. (Die Flächen unter den Graphen haben gleiche Inhalte.) Zur größeren Geschwindigkeit gehört die größere Induktionsspannung.

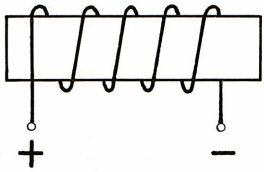
83 Die Ausschläge sind gleich.

84 1 T

85

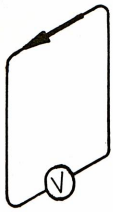


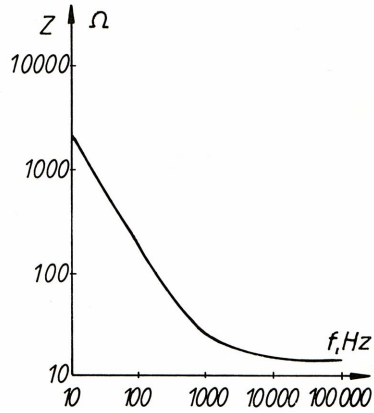
86



f	Z
10	2653
10^2	266
10^3	29,8
10^4	13,8
10^5	13,5

87





88 0,018 V

89 Der Erregerstrom muß linear ansteigen oder linear abfallen.

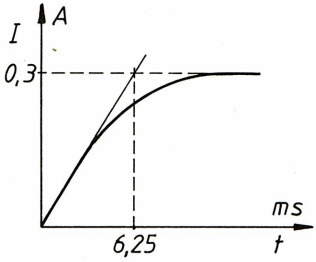
90 0,31 H

91 Das Lämpchen leuchtet kurz, aber kräftig auf.

92 a) 12 mH b) 3 Ω

93 $R_1 = R_2$ $R_3 < R_1$ $L_1 > L_2$ $L_2 = L_3$

94



95 a) 5,8 mJ b) 5,8 mJ c) 1,44 W; 28,8 J

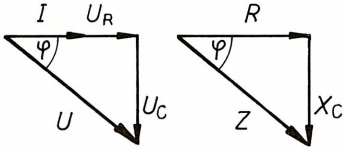
96 Die Stromstärke sinkt.

97 30 Ω; 95 mH

98 531 Ω; 6 µF

99 100 Hz

100



101 Die Phasenverschiebung wird kleiner.

102 1,59 A

103 319 V; 319 V; 12 V (Resonanz)

104 318 H

105 a) Die Induktivität der Spule wurde gerade so verringert, daß die Resonanzfrequenz 50 Hz beträgt.
b) Die Induktivität wurde so stark verringert, daß die Resonanzfrequenz weit über 50 Hz liegt.

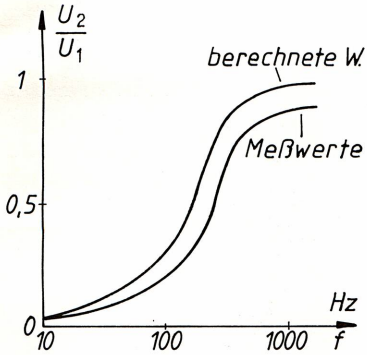
106 L_1 und L_2 leuchten hell. L_3 erlischt.

107 a) 75 mA b) 15 µF; 0,96 A

108 b) Die Schaltung läßt hohe Frequenzen besser durch als tiefe.
c)

f	U_1/U_2
10	0,0295
20	0,0590
40	0,1173
60	0,1745
80	0,2299
100	0,2832
200	0,5085
400	0,7632
600	0,8709
800	0,9209
1 000	0,9472
2 000	0,9860

108 a) und d)



109 Die Schaltung läßt tiefe Frequenzen besser durch als hohe.

110 1,66 A; 85,7°; 27,6 W; 0,076

111 2500 VA; 11,4 A

112 0,68;

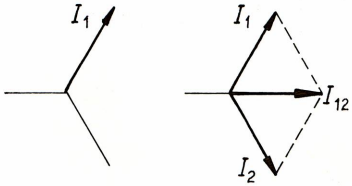
113 a) und c) kurzzeitiger Ausschlag
b) kein Ausschlag

114 0,068 A

115 14 Windungen; 0,14 A; 5,2 A

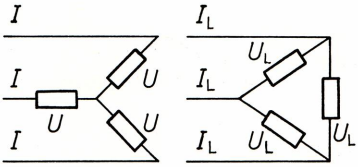
116 5720 V; 5,2 %

117 eine Lampe zwei Lampen



$|I_{12}| = |I_1| = |I_2|$

118 Sternschaltung Dreieckschaltung



$P_{St} = 3\,UI$ $U_L = \sqrt{3}\,U$

$I_L = \sqrt{3}\,I$

$P_{Dr} = 3\,U_L\,I_L = 9\,UI = 3\,P_{St}$

119 23,52 min

120 15,62 h

121 4,8 A

122 3,36 m

123 54 pF - 500 pF

Personen- und Sachregister

A

Ablenkung des Elektronenstrahls 96f
Akkumulator 90
Akzeptor 100
Ampère, André Marie (1775 - 1836), 24, 39
Ampere (1 A), 24, 42f
Amperemeter 25, 33
Amplitudenmodulation 115f
Anode 86ff
Anodenfall 92
Antenne 112ff
Arbeit im elektrischen Feld 11f
Arbeit, elektrische 28f
Außenleiter 80
Außenpolmaschine 84
Avalanche-Effekt 103
Äquipotentialfläche 13

B

Bandgenerator 15f
Base 87
Basis eines Transistors 104ff
Basisschaltung 105
Biot-Savartsches Gesetz 45
Blättchenelektroskop 9
Bleiakkumulator 90
Blindstrom 76
Blindwiderstand 69f, 76
Braunsche Röhre 96f
Bremsstrahlung 97

C

Chip 108
Coulomb (1 C) 5, 8
Coulomb, Charles Augustin (1736 - 1806) 7
Coulombsche Drehwaage 7
Coulombsches Gesetz 7f, 19

D

Daniell-Element 88
Datenverarbeitung, elektronische 55
Defektelektronen 100ff
Dehnungsmeßstreifen 36
Demodulation 115
Diamagnetismus 48
Diaphragma 88
Dielektrikum, 7, 18f
Dielektrizitätskonstante 7
Dielektrizitätszahl, relative 19
Diode 101f
Dipol, elektrischer 9, 19
Dipol, Hertzscher 112ff
Dipolmolekül 19
Dissoziation 86
Donator 98
Dotierung eines Halbleiters 100
Drain 106
Drehfeld 81
Drehkondensator 20
Drehspulinstrument 54
Drehstrom 80ff
Drehstromgenerator 80f, 84f
Drehstrommotor 85
Dreieckschaltung 81f
Dreiphasenwechselstrom 80ff
Durchflutung 46
Durchflutungssatz 46

E

Effektivwerte 68
Eigenfrequenz 111
Eigenleitung eines Halbleiters 99f
Einphasen-Wechselstrommotor 85
Einphasenwechselstrom 80
Einstellen des Empfängers 116
Elektrizitätsleitung im Vakuum 95ff
Elektrizitätsleitung in Festkörpern 97ff
Elektrizitätsleitung in Flüssigkeiten 86ff
Elektrizitätsleitung in Gasen 91
Elektrizitätsmenge 5
Elektrofilter 16
Elektrolyse 86f
Elektrolytkondensator 20
Elektromagnetismus 39ff

Elektrometer 9
Elektrometer, Braunsches 9
Elektronengas 99
Elektronenstrahlen 95ff
Elektronenstrahlröhre 95f
Elektronvolt (1 eV) 14
Elementarladung 6
Elementarmagnet 38
Elementarquantum 6
Emitter 104ff
Emitterschaltung 105
Empfangsdipol 112
Energie des Magnetfeldes 64ff
Energiebändermodell 99ff
Energiedichte des elektrischen Feldes 21
Energielücken 99ff
Erdung 15
Erhaltungssatz für Ladungen 6
Erregung, magnetische 45ff

F

Fadenstrahlrohr 43
Farad (1 F) 17
Faraday, Michael (1791 - 1867) 16, 17, 87
Faradaysche Gesetze 87f
Faradayscher Käfig 16
Farbcode auf Schichtwiderständen 28
Farbfernsehen 97f
Federpendel 110
Fehlerstrom-Schutzschaltung 82
Feld, elektrisches 5ff
Feld, elektrostatisches 9
Feld, homogenes 11, 17, 38
Feld, inhomogenes 38
Feld, magnetisches 38ff
Feld, physikalisches 9
Feld, quellenfreies 38
Feld, radiales 10
Feldeffekttransistor (FET) 106f
Feldkonstante, magnetische 45
Feldlinienbild 10f, 15, 38
Feldstärke, elektrische 10, 15, 114
Feldstärke, magnetische 45ff
Ferrimagnetismus 51
Ferromagnetismus, 38, 48, 49ff

Fluß, elektrischer 10
Fluß, magnetischer 41, 57, 67
Flußdichte, magnetische 41, 45ff, 114
Fotoeffekt, innerer 103
Fotostrom 103
Franklin, Benjamin (1706 - 1790) 5, 16
Frequenzmodulation 116

G

Galvani, Luigi (1737 - 1798) 89
Galvanische Elemente 88f
Galvanometer 55
Gasentladung, elektrische 91
Gate 106
Generator 84ff
Gewitter 15, 95
Gilbert, William (1544 - 1603) 5
Glaselektrizität 5
Gleichrichterdiode 102f
Gleichstrom 24ff, 67
Gleichstromgenerator 84
Gleichstrommotor 84
Glimmentladung 92
Glimmlampe 92f
glühelektrischer Effekt 93
Gray, Stephen (1670 - 1736) 6
Grenzfrequenz einer Fotodiode 103
Grundgesetz, elektrodynamisches 41f
Grundgleichung der Elektrostatik 10

H

Halbleiter 6f, 99ff
Halleffekt 44
hartmagnetisch 51
Harzelektrizität 5
Heißleiter 27
Hertz, Heinrich (1857 - 1894) 114
Hochfrequenzoszillator 112
Hofmannscher Zersetzungsapparat 87
Hybridtechnik 107
Hydratation 86
Hydronium-Ion 86
Hystereseschleife 50f

I

IC (Integrated Circuit) 107f
Impedanz 71ff
Induktion 57ff
Induktionsgesetz 57f, 59, 60
Induktivität 62ff, 69, 71ff

Influenz, elektrische 12
Influenz, magnetische 38
Influenzkonstante 7
Innenpolmaschine 84f
integrierte Schaltungen 107f
Integrated Circuit (IC) 107f
Ionen 86f
Ionisierungsenergie 14
Isolator 7

K

Kaltleiter 27
Kapazität eines Kondensators 17ff
Kapazitätsdiode 103
Katode 86ff
Katodenfall 92
Kennlinienfeld eines Transistors 105
Keramikkondensator 20
Kernkräfte 8
Kirchhoffsche Regeln 34f
Klemmenspannung 24, 30
Koerzitiverregung 50
Kollektor 100ff
Kollektorschaltung 101
Kondensator 11, 16ff
Kondensatorgleichung 17
Kondensatorschaltungen 21f
Kondensator im Gleichstromkreis 37
Kraftvektor 9
Kräfte im Magnetfeld 40ff
Kreis, elektrischer 52
Kreis, magnetischer 52f
Kurzschlußstrom 30

L

Ladearbeit am Kondensator 21
Ladung, elektrische 5, 24
Lambda-Halbe-Dipol 113
Laserdiode 103f
Lasthebemagnet 54
Lautsprecher 54
Leidener Flasche 20f
Leistung im Wechselstromkreis 75ff
Leistung, elektrische 28f
Leistungsfaktor 77
Leiter erster Klasse 86
Leiter zweiter Klasse 86
Leiter, elektrische 6f
Leitungsband 99ff
Leitungselektronen 99ff
Leitwert 26
Lenzsche Regel 59, 60, 61
Leuchtdiode 103
Leuchtstofflampe 94
Lichtbogen 93f
lichtelektrischer Effekt 103
Liniendiagramm 67ff
Linke-Hand-Regel (Lorentzkraft) 43
Linke-Hand-Regel (Motorregel) 41
Lorentzkraft 43, 60
Luminiszenzdiode 103

M

Magnetfeld der Erde 40
Magnetfeld einer Leiterschleife 39f
Magnetfeld einer Spule 40
Magnetfeld eines geraden Leiters 39
Magnetfeld, homogenes 67f
Magnetfeld, zirkulares 42
Magnetisierungskurve 49
Magnetostriktion 51
Magnetspeicher 55
Masche 34
Maxwell, James Clerk (1831 - 1879) 114
Modulation 115f
Monolithtechnik 108

N

n-Leitung 100ff
Natriumdampflampe 94
Nebenschlußgenerator 84
Netzwerk 34
Neutralleiter 80ff
Nichtleiter 6f
Niederfrequenz 115f
Nullung 82

O

Oersted, Christian (1777 - 1851) 39
Ohm (1 Ω) 25
Ohm, Georg Simon (1787 - 1854) 25
Ohmscher Widerstand im Wechselstromkreis 68f
Ohmsches Gesetz 25f
Ohmsches Gesetz des magnetischen Kreises 52
Ohmsches Gesetz für den Wechselstromkreis 71f

P

p-Leitung 100ff
Parallelresonanz 74
Parallelschaltung von Kondensatoren 21f
Parallelschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand 73
Parallelschaltung von Widerständen 31f
Paramagnetismus 48f
Peltiereffekt 109
Permeabilität, absolute 45
Permeabilität, relative 48
Phasenleiter 80f
piezoelektrischer Effekt 23
Piezoelektrizität 23
Plattenkondensator 17
pn-Übergang 98f
Polarisation eines Dielektrikums 19
Polarisation, elektrolytische 89
Potential, elektrisches 12f
Potentiometer 35
Primärspule 78f

Q

Quark 6
Quellenspannung 30

R

Radiowellen 115f
Rasiersteckdose 38
Rechte-Hand-Regel (Generatorregel) 60
Rechte-Hand-Regel für die stromdurchflossene Spule 40
Rechtsschraubenregel 39
Reibungselektrizität 6
Reihenresonanz 73
Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand 72f
Reihenschaltung von Widerstand und Spule 71
Reihenschlußgenerator 84
Relais 54
Remanenz 50
Resonanzfrequenz 73, 111f
Restflußdichte 50
Rotor 84
Röhrendiode 95f
Röntgenröhre 97
Rundfunk 115f
Rückkopplung 111

S

Sättigungsflußdichte 50
Säure 86
Schaltung von Meßgeräten 33
Schaltung, integrierte 107
Schaltungen von Kondensatoren 21f
Schaltungen von Widerständen 31
Scheinleistung 77
Scheinwiderstand 71ff
Scheitelwerte 67
Schichtwiderstand 28
Schiebewiderstand 28, 35
Schleusenspannung einer Diode 102
Schmelzsicherung 30
Schutzerdung 82
Schutzisolierung 82f
Schutzleiter 82
Schutztrennung 83
Schwingkreis 110ff
Schwingung, elektromagnetische 110ff
Schwingung, erzwungene 112
Schwingung, hochfrequente 112f
Schwingung, mechanische 110
Schwingung, ungedämpfte 110, 111ff
Seitenfrequenz 115
Sekundärspule 78f
Selbstinduktion 61f
Selbstinduktionsspannung 62ff
Sendedipol 113
Serienschaltung von Kondensatoren 21
Serienschaltung von Widerständen 31f
Shunt 33
Sicherungsautomat 31
Source 102
Spannungsquelle 24
Spannungsquelle, elektrochemische 89
Spannungsreihe, elektrochemische 89
Spannungsstoß 58
Spannungsteilung 35
Spektrum, elektromagnetisches 115
Sperrstrom 101
Stator 84
Sternschaltung 80ff
Sternspannung 80ff
Stoßionisation 91
Störstellenleitung 100ff
Strom, elektrischer 6
Stromquelle 24

Stromrichtung, physikalische 24
Stromrichtung, technische 24
Stromstärke 24ff
Stromwender 84
Superpositionsprizip 8f
Supraleitung 51

T

Temperaturkoeffizient 26
Tesla (1 T) 41
Theorie der elektromagnetischen Wellen 114f
thermoelektrischer Effekt 109
Thermoelektrizität 109
Thermosäule 109
Thermospannung 109
Thermostrom 109
Thomsonsche Frequenzformel 73, 111
Tonaufzeichnung 55
Transformator 60, 78ff
Transformator, belasteter 79
Transformator, unbelasteter 78f
Transistor 104ff
Transistor als Schalter 105
Transistor als Verstärker 105
Transistor-Oszillator 111f
Transistorbezeichnungen 107
Trägerwelle 115f

U

Urspannung 88
UV-Strahlung 94

V

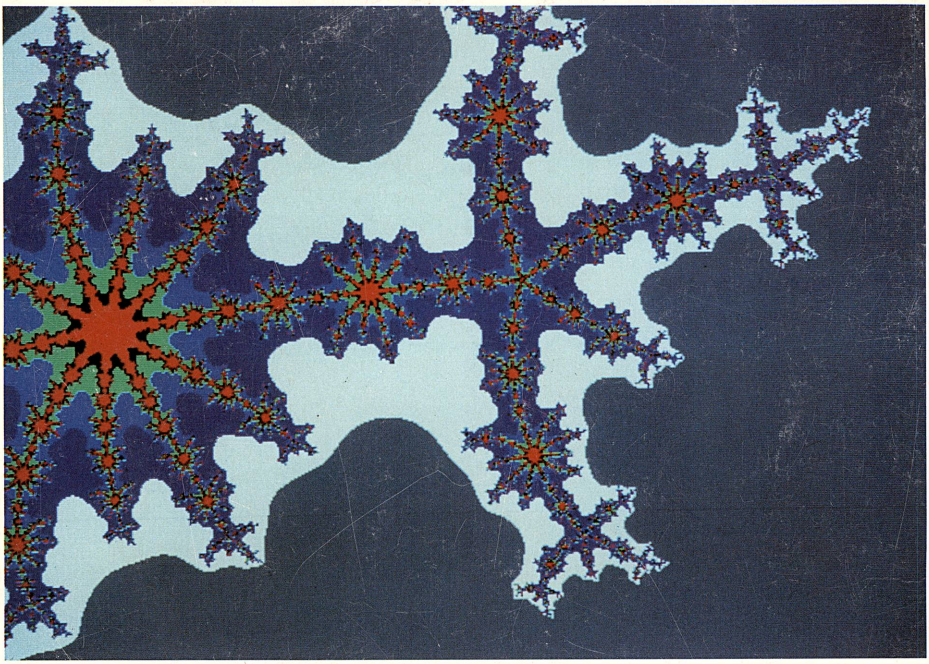
Valenzelektronen 99ff
Valenzband 99ff
Van-Allen-Gürtel 44
Varaktor 103
Vektorfeld 9
Verschiebungspolarisation 19
Volt (1 V) 12f
Volta, Alessandro (1745 - 1827) 13, 89
Voltmeter 25, 33

W

Waltenhofensches Pendel 61
Weber (1 W) 41
Wechselstrom 67ff
Wechselstrom, sinusförmiger 67ff
Wechselstromwiderstand 68ff
weichmagnetisch 51
Welle, elektromagnetische 113ff
Wheatstonesche Brücke 36
Wickelkondensator 20
Widerstand, elektrischer (Ohmscher) 25ff
Widerstand, induktiver 69f
Widerstand, innerer 29f
Widerstand, kapazitiver 69f
Widerstand, magnetischer 52
Widerstand, spezifischer 25
Wirbelströme 61
Wirkleistung 75f
Wirkwiderstand 75ff

Z

Zeigerdiagramm 67ff
Zeitablenkspannung 97
Zenerdiode 102f
Zenereffekt 102f
Zyklotron 44



Buch-Nr. 3838

Kraker - Paill
Physik, Band 3 HTL

© 1991 by Verlag E. Dorner Ges.m.b.H., Wien
Alle Ausgaben mit © 1991 sind nebeneinander verwendbar.

ISBN 3 - 7055 - 0065 - 1